

ANÁLISE DE POTENCIAIS MEDIDAS PARA MELHORIA DA EXPLORAÇÃO E GESTÃO DE ALBUFEIRAS DE ABASTECIMENTO URBANO. O CASO DA ALBUFEIRA DE PRETAROUCA

PEDRO NUNO LOPES MAGALHÃES CORREIA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM HIDRÁULICA

Orientador: Professor Doutor Rodrigo Jorge de Oliveira Maia

Coorientador: Engenheiro José António Boal Paixão

JUNHO DE 2018

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2017/2018

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2017/2018 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2018.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Aos meus Pais,

Tudo o que é difícil deve tentar-se enquanto é fácil

Lao Zi

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Rodrigo Maia, agradeço a pronta disponibilidade, ajuda e apoio prestado na Faculdade, ajudando-me sempre na procura de melhores soluções, pela dedicação e impulso ao longo deste semestre.

Ao Engenheiro José Boal Paixão, agradeço o desafio e incentivo à realização deste trabalho e todas as condições que me proporcionou para o seu desenvolvimento e conclusão.

À Engenheira Sofia Gonçalves, agradeço por todo o apoio, disponibilidade, amizade e simpatia demonstrada ao longo do período de realização da tese.

Aos que durante estes últimos anos partilharam comigo o dia-a-dia – Diogo Dias, João Salvador, João Machado, Francisco Pinto, João Mendes, Inês Varandas – e a todos os meus outros amigos e colegas que passaram pela minha vida académica, agradeço o total companheirismo, amizade incondicional, e toda a força expressa para que a meta fosse alcançada.

Aos meus pais, agradeço o seu amor incondicional, a educação e todas as condições que me proporcionaram para eu poder chegar até aqui. Às minhas irmãs, Leonor e Inês, agradeço-lhes também, bem como à minha família, a amizade, paciência e força que me deram durante este percurso.

À Rafaela, agradeço-lhe, de forma muito especial, a sua compreensão e companheirismo nestes últimos anos. Pela paciência e conselhos dados, agradeço-lhe por alegrar os meus dias com a sua presença.

RESUMO

Os principais cursos de água em Portugal são regularizados por uma grande rede de barragens, muito devido às características hidrológicas existentes. Às barragens, estão associadas pequenas ou grandes albufeiras, que poderão ter várias funcionalidades. A sua gestão depende dos seus fins e da necessidade de os respeitar, face a múltiplos problemas de decisão decorrentes no dia-a-dia.

O objetivo central da presente dissertação consiste, no desenvolvimento e aplicação de uma metodologia de cálculo, relacionada, essencialmente, com a determinação dos caudais afluentes à albufeira de Pretarouca, que possa ser utilizada de forma contínua no tempo e que permita analisar um conjunto de dados, para que, em tempo oportuno, se possam tomar medidas de exploração da albufeira adequadas ao estudo realizado, através de uma gestão mais eficaz dos volumes armazenados.

Para esse fim, foi desenvolvida, e aplicada à bacia de Pretarouca, uma metodologia que visa examinar uma análise comparativa entre: 1) estudo previsto em projeto, por base de um modelo de precipitação-escoamento de uma série histórica com 30 anos; e 2) resultados obtidos por regras de operação sugeridas no âmbito deste trabalho, para um período recente de 7 anos hidrológicos de análise. Para tal, foi procurado avaliar e desenvolver uma análise que relacionasse os dois pontos, de forma a retirar conclusões que permitissem melhorar as medidas de exploração da albufeira de Pretarouca. É realizada a formulação de um evento crítico hipotético com base no ano mais seco analisado, bem como o estudo comportamental da albufeira face ao mesmo.

Seguidamente, foi desenvolvido um sistema de alerta de recursos hídricos na albufeira de Pretarouca, que visa tornar-se um método importante de prevenção às necessidades da albufeira. O seu objetivo consiste no apoio do controlo dos níveis da albufeira, de modo a prevenir o perigo de stress ao abastecimento urbano.

PALAVRAS-CHAVE: Albufeiras, Estudo hidrológico, Gestão de volumes, Exploração de albufeiras, Balanço Hidrológico

ABSTRACT

The main water courses in Portugal are settled by a big net of dams, mostly because of the existing hydrological characteristics. There are big and small reservoirs - that might have multiple functions - associated to the dams. Reservoirs' management depends on their objectives and on the necessity of respecting them, facing multiple decision problems that occur every day.

This thesis's main objective consists in the development and application of a calculation method - essentially related to the determination of the streams affluent to the Pretarouca's dam – that can be used continuously and allow us to analyze data, so that reservoir's exploration measures can be applied through a more efficient volume storage's management.

For that purpose, a methodology was developed and applied to Pretarouca river with the objective of examining a comparative analysis between: 1) project's planned study – through a precipitation-flow of an historical series with 30 years; and 2) results that were obtained by operation rules suggested within this work/project, for a recent period of 7 hydrological years of analysis. So, an analysis that could relate those two points was developed and evaluated, allowing to draw conclusions that permit to upgrade the Pretarouca dam exploration measures. A hypothetical critical event based on the driest year analyzed is formulated, as well as the behavioral study between the dam and the event.

After this, an alert system - related to Pretarouca dam hydric resources - is developed, with the intent of this being an important security method to the dam's necessities. Its main objective consists in supporting the control of the dam's levels, to prevent the danger of stress in urban supply.

KEYWORDS: Reservoirs, Hydraulic Studies, Water Balance, Water volume management, Reservoir's exploration

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	V
RESUMO	VII
ABSTRACT	IX
ÍNDICE DE CAPÍTULOS	XI
ÍNDICE DE FIGURAS	XII
ÍNDICE DE TABELAS	XV
LISTA DE ABREVIATURAS E ACRÓNIMOS	XIX
1 INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO DO TEMA E OBJETIVOS	1
1.2. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	2
2 CONCEITOS BASE	5
2.1. IMPORTÂNCIA DAS ALBUFEIRAS	5
2.2. QUALIDADE DA ÁGUA	6
2.3. SEDIMENTAÇÃO NAS ALBUFEIRAS	7
2.4. PREENCHIMENTO DE FALHAS EM SÉRIES DE PRECIPITAÇÃO	9
2.4.1. REGRESSÃO LINEAR OU MÉTODO DAS DUPLAS ACUMULAÇÕES.....	9
2.4.2. MÉDIA PONDERADA	11
2.5. MÉTODOS DE CÁLCULO DA EVAPORAÇÃO	11
2.5.1. MÉTODO DO BALANÇO VOLUMÉTRICO	12
2.5.2. MÉTODO DO BALANÇO ENERGÉTICO.....	12
2.5.3. MÉTODO DE TRANSFERÊNCIA DE MASSA	15
2.5.4. MÉTODO COMBINADO	15
2.6. DIMENSIONAMENTO DA CAPACIDADE ÚTIL DAS ALBUFEIRAS	17
2.6.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS	17
2.6.2. MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DA CAPACIDADE DE UMA ALBUFEIRA	17
3 CASO DE ESTUDO – BARRAGEM DE PRETAROUCA	25
3.1. ÁGUAS DO NORTE, S.A.....	25
3.2. CARACTERIZAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO BALSEMÃO	25
3.3. DESCRIÇÃO DA BARRAGEM DE PRETAROUCA	27
3.3.1. CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA E GEOTÉCNICA LOCAL	28
3.3.2. ÓRGÃOS HIDRÁULICOS INCORPORADOS NA BARRAGEM	29

3.3.3. SISTEMA BY-PASS	32
3.3.4. CURVAS DE ÁREAS INUNDADAS E VOLUMES ARMAZENADOS.....	35
4 METODOLOGIA APLICADA	39
4.1. INTRODUÇÃO	39
4.2. ANÁLISE E VALIDAÇÃO DO ESTUDO HIDROLÓGICO PREVISTO.....	40
4.2.1. AVALIAÇÃO DA PRECIPITAÇÃO PONDERADA NA BACIA DO BALSEMÃO.....	40
4.2.2. AVALIAÇÃO DOS ESCOAMENTOS SUPERFICIAIS NA BACIA HIDROGRÁFICA.....	44
4.3. ESTUDO DO DESEMPENHO DA ALBUFEIRA DE PRETAROUCA	47
4.3.1. DESCARREGADOR DE CHEIAS	47
4.3.2. DESCARREGADOR DE FUNDO.....	50
4.3.3. ABASTECIMENTO DE ÁGUA	52
4.3.4. CIRCUITO DE DESCARGA DE CAUDAIS ECOLÓGICOS E SISTEMA DE “BY-PASS”	54
4.3.5. CAUDAIS PERCOLADOS	58
4.3.6. VOLUMES EVAPORADOS PELA ALBUFEIRA.....	59
4.4. AFLUÊNCIAS À ALBUFEIRA DE PRETAROUCA	67
5 ANÁLISE E AVALIAÇÃO DE RESULTADOS	69
5.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	69
5.2. ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS RESULTADOS PREVISTOS EM PROJETO E OS OBTIDOS	69
5.2.1. VALORES RESULTANTES DA EVAPORAÇÃO	69
5.2.2. RESULTADOS RELATIVOS AO ABASTECIMENTO URBANO	71
5.2.3. RESULTADOS RELATIVOS AOS CAUDAIS ECOLÓGICOS	72
5.2.4. ANÁLISE DAS AFLUÊNCIAS	74
5.3. DESEMPENHO DA ALBUFEIRA FACE A 2 ANOS COM AFLUÊNCIAS SEMELHANTES AO ANO MAIS SECO.....	78
5.4. ANÁLISE DE EVENTUAL SOLUÇÃO A ADOTAR EM FUNÇÃO DOS RESULTADOS DO MODELO	84
5.5. SISTEMA DE PREVISÃO E ALERTA DE RECURSOS HÍDRICOS	86
5.5.1. AVALIAÇÃO DAS PREVISÕES	87
5.5.2. AVALIAÇÃO DA SITUAÇÃO CORRENTE NA ALBUFEIRA	93
6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA O FUTURO	97
ANEXOS	103

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Distribuição global (por país) de grandes albufeiras. (Lehner <i>et al.</i> , 2011).....	5
Figura 2 – Relação entre a taxa de acumulação da matéria orgânica com o tempo de residência da água (Mulholland e Elwood, 1982)	8
Figura 3 – Esquema típico de deposição dos sedimentos nas albufeiras. (adaptado de (Lameiro, 2009))	9
Figura 4 - Determinação da reta do tipo $y=mx+b$, resultante dos valores acumulados (Maia, 2015) ...	10
Figura 5 - Esquema do balanço energético. (Lencastre e Branco, 2010)	13
Figura 6 - Método de Rippl. Determinação da capacidade útil (C) necessária a satisfazer as exigências desejadas (Q), a partir de uma albufeira alimentada por uma dada série de escoamentos afluentes (X). Adotado de (Guimarães, 2005)	19
Figura 7 - Método da curva acumulada dos escoamentos. Determinação da capacidade útil (C) necessária para satisfazer as exigências desejadas (Q), a partir de uma albufeira alimentada por uma dada série de escoamentos afluentes (X). Adaptado de (Guimarães, 2005)	20
Figura 8 - Método da curva acumulada residual acumulada. Determinação da capacidade útil (C) necessária para satisfazer as exigências desejadas (Q), a partir de uma albufeira alimentada por uma dada série de escoamentos afluentes (X). Adaptado por (Guimarães, 2005)	21
Figura 9 - Método do pico sequencial. Determinação da capacidade útil (C) necessária para satisfazer as exigências desejadas (Q), a partir de uma albufeira alimentada por uma dada série de escoamentos afluentes (X). Adaptado por (Guimarães, 2005).....	22
Figura 10 – Gráfico esquemático das variáveis intervenientes nas equações descritas. Adotada de (Silva, 2013).....	23
Figura 11 - Localização do Rio Balsemão (Website <i>Mapcarta</i>)	26
Figura 12 - Bacia Hidrográfica do Douro (Agência Portuguesa do Ambiente, 2016)	27
Figura 13 - Barragem de Pretarouca [2]	28
Figura 14 - Descarregador de cheias da barragem de Pretarouca (Águas do Norte S.A. 2013).	29
Figura 15 - Bacias de dissipação de energia (principal e auxiliar) (Águas do Norte S.A. 2013).....	30
Figura 16 - Descarga de fundo da barragem de Pretarouca (Águas do Norte S.A. 2008)	31
Figura 17 - Tomadas de água nos diferentes níveis no corpo da barragem de Pretarouca (Águas do Norte S.A. 2008)	32
Figura 18 - Açude a montante da albufeira de Pretarouca a descarregar (Águas do Norte S.A. 2013)	33
Figura 19 - Canal "By-Pass" da barragem de Pretarouca (Águas do Norte S.A. 2013).....	34
Figura 20 – Escada de peixes da barragem de Pretarouca.....	34
Figura 21 - Planta topográfica da albufeira de Pretarouca (CENOR, 2007)	35
Figura 22 - Curva de área inundada na albufeira de Pretarouca	37

Figura 23 - Curva do Volume armazenado na albufeira de Pretarouca	37
Figura 24 – Identificação das estações meteorológicas na bacia hidrográfica em estudo.....	40
Figura 25 - Aplicação do método de Thiessen	41
Figura 26 - Correlação entre a precipitação P(mm) e o escoamento anual H(mm) na Estação Hidrométrica de Cabriz.....	44
Figura 27 - Coeficiente de vazão de uma soleira descarregadora Creager em função de H/H_0	47
Figura 28 – Amortecimento de cheia milenar no descarregador de cheias da barragem	48
Figura 29 - Esquema de cálculo dos caudais descarregados pelo descarregador de cheias	49
Figura 30 – Vazão de um orifício retangular controlado por uma comporta (Quintela, 2011)	50
Figura 31 - Esquema de cálculo dos caudais descarregados pela descarga de fundo	51
Figura 32 - Volumes captados (m^3) e correspondentes captações no ano hidrológico 2016/17	54
Figura 33 - Circuito em paralelo responsável pela descarga de caudal ecológico	56
Figura 34 - Sondas que contabilizam o caudal escoado na escada de peixes	58
Figura 35 - Bombas responsáveis pelo lançamento dos caudais infiltrados para montante	59
Figura 36 – Esquema da temperatura média mensal máxima e mínima no concelho de Lamego, Viseu [3]	64
Figura 37 - Variação dos valores de Δ com a temperatura para $p=1000$ mb (Lencastre e Branco, 2010)	65
Figura 38 - Velocidade média do vento para a região de Lamego, Viseu (km/hora) [3]	66
Figura 39 - Evaporações previstas em projeto e obtidas segundo o modelo combinado de Penman (mm/mês)	71
Figura 40 - Comparação entre a população que estaria prevista abastecer e a população abastecida	72
Figura 41 - Volumes descarregados pelos sistemas de descarga de caudal ecológico, a partir de 01/10/2013.....	73
Figura 42 – Escoamentos anuais afluentes à albufeira estimados em projeto (m^3) para o período de 30 anos (Águas do Norte S.A. 2007)	74
Figura 43 – Gama de variação dos volumes anuais afluentes à barragem de Pretarouca no período compreendido entre 1963/64 e 1994/95.	75
Figura 44 - Nível da água para a albufeira de Pretarouca no período de 01/10/2011 a 01/06/2018	76
Figura 45 - Volume armazenado na albufeira de Pretarouca no período de 01/10/2011 a 01/06/2018	76
Figura 46 - Comparação entre as previsões de volumes mensais afluentes máximos e mínimos ocorridos num período histórico de 30 anos, com os volumes afluentes calculados para o período compreendido entre 01/10/2011 e 01/06/2018.....	77
Figura 47 - Aplicação dos sistemas de caudais ecológicos.....	79

Figura 48 - Distribuição mensal dos volumes captados por ano, para o abastecimento de 70% da população	80
Figura 49 - Nível da cota da água na albufeira de Pretarouca para um período de 2 anos com afluências de 2016/17 e abastecimento a 70%	81
Figura 50 - Volume armazenado na albufeira de Pretarouca para um período de 2 anos com afluências de 2016/17 e abastecimento a 70%	81
Figura 51 - Distribuição mensal dos volumes captados por ano, para um abastecimento de 100% da população	82
Figura 52 - Nível da cota da água na albufeira de Pretarouca para um período de 2 anos com afluências de 2016/17 e abastecimento a 100%	83
Figura 53 - Volume armazenado na albufeira de Pretarouca para um período de 2 anos com afluências de 2016/17 e abastecimento a 100%	83
Figura 54 - Nível da cota da água na albufeira de Pretarouca para um período de 2 anos com afluências de 2016/17, abastecimento a 100% e NPA à cota 920,0.	85
Figura 55 - Volume armazenado na albufeira de Pretarouca para um período de 2 anos com afluências de 2016/17, abastecimento a 100% e NPA à cota 920,0.	85
Figura 56 - Esquema de funcionamento do Sistema de Previsão e Alerta de Recursos Hídricos	87
Figura 57 - Evolução mensal da precipitação (mm) no período compreendido entre 1963/64 e 1994/95	88
Figura 58 - Precipitação acumulada (mm) no período compreendido entre 1963/64 e 1994/95.....	89
Figura 59 - Avaliação da precipitação acumulada (mm) nos principais anos secos do período compreendido entre 1963/64 a 1994/95	90
Figura 60 - Comparação da precipitação acumulada nos principais anos secos e no período em análise com os valores correspondentes dos descritores P25, P50 e P75	91
Figura 61 - Avaliação dos escoamentos afluentes acumulados mensais nos principais anos secos e comparação com os escoamentos afluentes acumulados mensais dos descritores P25, P50 e P75..	92
Figura 62 - Representação dos níveis de alerta a aplicar no caso de estudo, para o período de 01/10/2011 a 01/06/2018	94

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 –Referência para o estabelecimento de segurança da qualidade de água (adotado de (WHO, 2004))	7
Tabela 2 - Séries de valores de precipitações (Maia, 2015)	10
Tabela 3 - Séries de valores de precipitações acumuladas.....	10
Tabela 4 - Áreas inundadas e volumes armazenados na albufeira de Pretarouca (CENOR, 2007).	36
Tabela 5 – Postos pluviométricos.....	41
Tabela 6 – Áreas de influência	42
Tabela 7 - Séries de precipitações anuais nos postos pluviométricos e precipitações anuais ponderadas na bacia hidrográfica da barragem de Pretarouca para um período de 30 anos.	43
Tabela 8 - Séries de precipitações, défices de escoamento e escoamentos anuais afluentes à albufeira de barragem de Pretarouca (CENOR, 2007)	45
Tabela 9 - Distribuição mensal das aflúências num ano de características médias em Pretarouca.....	46
Tabela 10 - Volumes descarregados mensalmente pelo descarregador de cheias, desde 2011/12....	49
Tabela 11 - Coeficientes de contração para diferentes graus de abertura da comporta.....	51
Tabela 12 - Volume descarregado mensalmente pela descarga de fundo, a partir de 01/10/2011.....	52
Tabela 13 - População em estudo (Águas do Norte, 2018)	53
Tabela 14 - Evolução da quantidade de população abastecida pela albufeira de Pretarouca (Águas do Norte, 2018).....	53
Tabela 15 - Volume captado mensalmente, a partir de 01/10/2011	53
Tabela 16 - Programa de caudais ecológicos mínimos a garantir em anos médios e húmidos	55
Tabela 17 - Programa de caudais ecológicos mínimos a garantir, em anos abaixo da média.....	55
Tabela 18 – Volume descarregado pela Descarga de Caudal ecológico (m³).....	56
Tabela 19 - Volume contabilizado mensalmente pelo sistema de "By-Pass", a partir de 01/10/2011 ..	57
Tabela 20 - Volume descarregado mensalmente pelos circuitos de caudal ecológico (m³) no período compreendido entre 2013/14 e 2017/18	57
Tabela 21 - Volumes bombados provenientes da percolação	59
Tabela 22 – Radiação solar média recebida num plano horizontal no limite superior da atmosfera - I_0 (cal/cm ² .dia) (Lencastre e Branco, 2010).....	60
Tabela 23 – Número máximo de horas ao sol em função da latitude (Lencastre e Branco, 2010)	61
Tabela 24 - Relação entre a Nebulosidade (décimos) com a insolação. (Lencastre e Branco, 2010)..	62
Tabela 25 - Nebulosidade média mensal na região de Lamego e correspondente insolação. ((<i>Weather Avenue</i>) e (Lencastre e Branco, 2010))	62
Tabela 26 – Constantes de Angström.....	63
Tabela 27 – Albedo em função da cobertura vegetal	63

Tabela 28 - Temperaturas médias mensais mínimas e máximas em Lamego, Viseu [3]	65
Tabela 29 - Resultados do método combinado segundo a fórmula de Penman	66
Tabela 30 - Volume evaporado mensalmente (m ³) a partir de 01/10/2011	67
Tabela 31 - Volume mensal afluente à albufeira de Pretarouca, a partir de 01/10/2011	68
Tabela 32 – Evaporações previstas para a albufeira de Pretarouca em fase de projeto (CENOR, 2007)	70
Tabela 33 - Afluências mensais estimadas para os anos hidrológicos de 1978/79 e 1988/89.....	75
Tabela 34 - Resultados do processo comparativo entre os volumes afluentes previstos em projeto e os volumes afluentes calculados no período compreendido entre 01/10/2011 e 01/06/2018.....	78
Tabela 35 - Valores dos percentis 25,50 e 75 mensais (mm) para a albufeira de Pretarouca, no período em análise	91
Tabela 36 - Volumes de escoamento afluente à albufeira de Pretarouca para o período compreendido entre 1963/74 a 1994/95	103
Tabela 37 - Resultados do método adotado para estimar a evaporação	107
Tabela 38 - Volume de escoamento afluente à albufeira de Pretarouca nos principais anos de seca e volumes afluentes estimados pelos descritores P25, P50 e P75.....	108
Tabela 39 - Balanço Hídrico para um evento de 2 anos consecutivos com volumes de escoamento afluentes de 2016/17, para o abastecimento de 70%.....	1
Tabela 40 - Balanço Hídrico para um evento de 2 anos consecutivos com volumes de escoamento afluentes de 2016/17, para o abastecimento de 100%.....	2
Tabela 41 - Balanço Hídrico para um evento de 2 anos consecutivos com volumes de escoamento afluentes de 2016/17, para o abastecimento de 100%, com o acréscimo da subida do coroamento do descarregador de cheias à cota 920,0.....	3
Tabela 42 - Balanço Hídrico para um evento de 2 anos consecutivos com volumes de escoamento afluentes baseados nos valores de precipitação definidos pelo descritor estatístico P25, para um abastecimento de 100%.....	4

LISTA DE ABREVIATURAS E ACRÓNIMOS

AdN – Águas do Norte S.A.

APA – Agência Portuguesa do Ambiente

DIA – Declaração de Impacte Ambiental

E.H. – Estação Hidrométrica

NMC – Nível máximo de cheia

NME – Nível mínimo de exploração

NPA – Nível de pleno armazenamento

OMS – Organização Mundial de Saúde

RSB – Regulamento de Segurança de Barragens

SAA – Sistemas de abastecimento de água

1 INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO DO TEMA E OBJETIVOS

Sendo um recurso natural indispensável à vida na Terra, a água representa um bem primário essencial e de enorme valor económico, ambiental e social à sobrevivência do Homem e de todos os ecossistemas existentes no nosso Planeta. Durante milhares de anos, subsistiu a ideia de que a água seria um recurso infinito, devido à sua abundância presente na Natureza. Atualmente, a situação hidrológica requer uma atenção especial, em virtude da decrescente disponibilidade de água doce. A sobre-exploração dos recursos hídricos e as recorrentes secas estão na origem da escassez hídrica.

Os principais cursos de água são regularizados por meio de barragens. As grandes barragens são genericamente caracterizadas e assim classificadas por obedecerem a pelo menos um dos seguintes critérios: capacidade de armazenamento superior a 1hm³; altura de coroamento superior a 15 metros em relação à cota mais baixa da superfície geral das fundações (Regulamento de Segurança das Barragens, 1983). Às barragens, estão associadas pequenas ou grandes albufeiras de uso mono ou polivalente, ou seja, poderão ter uma ou várias funcionalidades, tais como: conservação de água para abastecimento às populações para uso doméstico, industrial e agrícola; controlo de cheias; produção de energia hidroelétrica; navegação; e lazer. Existem, no entanto, múltiplos problemas de decisão na análise à gestão operacional de uma albufeira. Problemas que vão desde a determinação da capacidade de armazenamento ótima à seleção de políticas de operação da albufeira ideal.

Neste contexto, a regularização de caudais é um aspeto importante para mitigar os problemas associados à variação temporal dos mesmos. Em situações onde a escassez ou o excesso de água possam criar conflito, surge a necessidade de impor regras de exploração, as quais devem ser tidas em consideração para a gestão de albufeiras, de acordo com os diferentes cenários de afluências. Essas regras são aplicáveis nos períodos em que existe maior probabilidade de ocorrência de seca ou de cheias. Nos meses húmidos, impõe-se um nível de água nas albufeiras mais baixo, com o objetivo de prevenir cheias e assim garantir a existência de volume livre para amortecimento. Consequentemente, esta imposição irá ter repercussões e pode ser posta em causa, caso ocorra um ano particularmente seco, dado que os abastecimentos doméstico, agrícola e industrial são uma medida prioritária. Na realidade, nem sempre, nestas condições, se obtém a reserva necessária para satisfazer as imposições regulamentares. De forma similar, surgem igualmente restrições à exploração de aproveitamentos hidroelétricos, decorrentes da diminuição do desnível hidráulico.

Às entidades gestoras dos sistemas de abastecimento de água compete fornecer água tratada aos consumidores, assumindo um papel importante na conceção e operação de redes de abastecimento. A fiabilidade do sistema é aferida pelo grau de garantia alcançado no abastecimento dos clientes em condições aceitáveis. Em geral, estas entidades despendem elevadas quantidades de energia elétrica,

decorrentes da incorporação nos sistemas de estações elevatórias com vista a permitir o transporte de água desde a captação ao local de consumo desejado. Tal representa, frequentemente, o maior encargo financeiro despendido na exploração do sistema pelas entidades responsáveis pela captação. Tem sido objetivo, por parte de vários investigadores, obter um modelo ideal de operação dos grupos elevatórios, no qual se procura obter satisfação máxima por parte dos consumidores aliado a menores encargos refletidos pelas entidades responsáveis, chegando a um nível de rentabilidade ideal.

O presente trabalho enquadra-se no âmbito de um estudo que a Águas do Norte, S. A., sugere e preza desenvolver, com o objetivo de e confirmar dados de base adotando novas medidas de exploração face à ausência de aflúências em vários meses de estiagem, tirando partido de captação na albufeira de Pretarouca.

O objetivo principal do trabalho consiste no desenvolvimento e aplicação de uma metodologia de cálculo dos caudais e volumes afluentes face às diferentes funções e condicionamentos impostos pelos diferentes órgãos hidráulicos da barragem. Para tal, esta metodologia deverá ter em conta as variações hidrológicas ao longo do tempo e as características do aproveitamento hidráulico existentes. Dados os resultados dos escoamentos afluentes à albufeira de Pretarouca, é objetivo realizar uma análise geral comparativa do aproveitamento hidráulico entre os resultados previstos no projeto e os resultados calculados pela aplicação da metodologia de cálculo dos volumes afluentes desenvolvida.

O objetivo específico deste estudo consiste na análise de medidas operacionais para que, através do balanço hídrico, se possam retirar conclusões decisivas destinadas a rentabilizar os volumes armazenados. Com base nos dados existentes, o objetivo específico foi observar o desempenho da albufeira de Pretarouca face a um cenário de 2 anos consecutivos com volumes de escoamento afluentes idênticos ao ano mais seco observado desde que a albufeira se encontra em exploração. Foi analisado – para várias situações – os efeitos causados pela regularização dos caudais na albufeira, e dada a falha em cumprir com as prioridades legais, procedeu-se ao estudo de uma alternativa de gestão operacional que consistiu na subida do alteamento do descarregador de cheias. Por último, fez igualmente parte do objetivo deste trabalho, o desenvolvimento de um sistema de alerta de prevenção de secas e a implementação de três níveis de alerta, através da constante monitorização dos níveis da albufeira.

1.2. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente tese encontra-se composta em seis capítulos, aos quais se acrescentam, no final da mesma, a listagem com as referências bibliográficas e os anexos.

O capítulo 1 reflete esta introdução. Compreende uma breve descrição do tema apresentado, a definição dos objetivos principal e específico do estudo e a descrição estrutural da tese.

No capítulo 2, é apresentada a revisão bibliográfica, com a contextualização do estado geral do conhecimento relativo ao tema da tese. São expostos os principais conceitos assim como uma explicação sobre matérias fundamentais ao desenvolvimento deste trabalho.

No capítulo 3, é descrito e caracterizado o caso de estudo relativo à barragem de Pretarouca, o qual retrata as principais características da bacia hidrográfica e dos órgãos hidráulicos fundamentais, bem como as curvas de áreas inundadas e de volumes armazenados.

O capítulo 4, apresenta as metodologias desenvolvidas de forma a obter o cálculo dos volumes de escoamento mensais afluentes à albufeira de Pretarouca, tanto em projeto para uma série histórica de 30 anos como pelos métodos descritos ao longo do capítulo para o período compreendido entre 01/10/2011

a 01/06/2018. Foca-se essencialmente na descrição de cada processo da aplicação dos métodos utilizados para cada órgão hidráulico e correspondentes resultados obtidos.

No capítulo 5, é desenvolvida a análise comparativa resultante da aplicação da metodologia apresentada no capítulo 4 ao caso de estudo. Primeiramente são efetuadas comparações dos resultados estimados em projeto com os resultados obtidos da aplicação utilizada neste trabalho. De forma a idealizar um cenário crítico, é observado o desempenho da albufeira face a volumes de escoamento afluentes idênticos aos volumes de escoamento do ano mais seco observado, durante dois anos consecutivos. Dada a falha em cumprir com as prioridades legais, procede-se ao estudo de uma alternativa de gestão operacional que consistiu na subida do alteamento do descarregador de cheias. Por último, é desenvolvido um sistema de alerta de prevenção de secas e a implementação de três níveis de alerta, através da constante monitorização dos níveis da albufeira.

Por último, no capítulo 6, agrupam-se as principais conclusões obtidas do trabalho realizado e apresentam-se recomendações para potenciais futuras melhorias.

2 CONCEITOS BASE

2.1. IMPORTÂNCIA DAS ALBUFEIRAS

O armazenamento de água nos reservatórios é um dos principais mecanismos de fornecimento no abastecimento de água. Globalmente, a água presente nas albufeiras fornece um valor estimado entre 30% a 40% com destino ao abastecimento urbano (World Commission on Dams, 2000), 20% contribui para a geração de energia elétrica na forma de energia hidroelétrica (Demirbas, 2009) e beneficia de uma série de finalidades relacionadas com o controlo de inundação, atividades recreativas e navegação.

Durante o século passado, o Homem construiu mais do que 45.000 barragens (com mais de quinze metros de altura) no mundo, concebendo uma capacidade útil de armazenamento estimada entre 6700 e 8000 km³ (World Commission on Dams, 2000). O pico da instalação de grandes barragens aconteceu entre os anos 60 e 70, com o crescente interesse na produção hidroelétrica renovável (Lettenmaier e Milly, 2009).

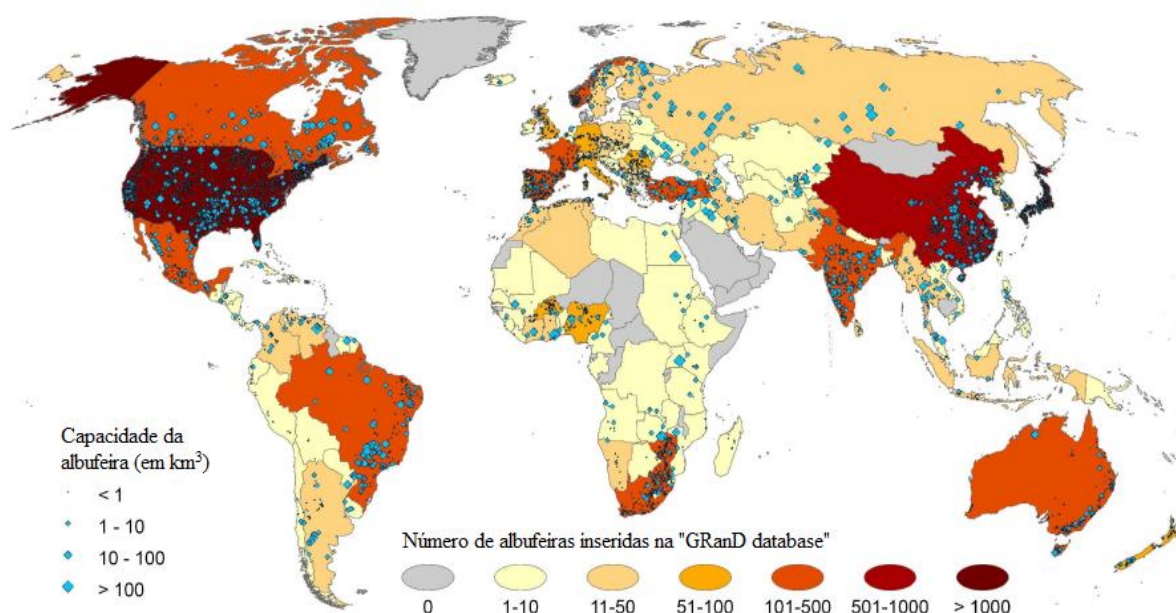


Figura 1 – Distribuição global (por país) de grandes albufeiras. (Lehner *et al.*, 2011)

Apesar do século XX ter sido associado a uma relativa abundância de água e ao progresso de inúmeros projetos relacionados com o desenvolvimento dos recursos hídricos, foi expectado que o presente século

corresponda a um aumento significativo da escassez de água em resposta ao progressivo crescimento da população e aumento da economia (Morris e Fan, 1998)

Existe água suficiente para o fornecimento de alimentos à crescente população no mundo, mas, devido à distribuição desigual de água, pode-se esperar que, nos países que sofrem de escassez de água, como os do Norte de África, as necessidades da população ultrapassem, tornando-os extremamente dependentes de alimentos importados. Em virtude do acentuado crescimento da população na China, foi esperado que esta se tornasse o maior importador de alimentos de forma a satisfazer a população que sofria constantemente com a falta de água (Brown, 1995).

Em países em que seria essencial maior quantidade de precipitação de forma a combater a escassez de água e concretizar as necessidades da população, os elevados preços da alimentação tornam-se um problema crítico no balanço económico e na segurança pública (Morris e Fan, 1998).

As barragens são o único tipo de infraestrutura em que é concretizável controlar a regulação do abastecimento de água. Será de esperar que a importância das albufeiras aumente, à medida que a população, a atividade económica e as restantes procuras tendem a crescer (Morris e Fan, 1998).

Entretanto, a acumulação descontrolada de sedimentos nas albufeiras de armazenamento de água, torna-se um dos principais fatores de insustentabilidade dos sistemas modernos de abastecimento de água, nomeadamente porque afeta diretamente a qualidade da água.

2.2. QUALIDADE DA ÁGUA

Nos dias de hoje, a qualidade da água requerida varia consoante a sua utilização e é definida em função da aptidão para a finalidade a que se destina. A garantia da qualidade da água fornecida por um sistema de abastecimento de água constitui elemento essencial das políticas de saúde pública e tem como finalidade o uso doméstico, servindo para uso alimentar e uso higiénico pessoal, práticas gerais numa habitação, limpeza pública, rega de espaços verdes e apoio a todo o tipo de atividades lúdicas. A maior percentagem destes destina-se ao uso doméstico, pelo que, é exigido um cuidado especial em termos de qualidade. Para além de ser potável, a água deverá apresentar características indolores e incolores, de modo a satisfazer as necessidades dos consumidores.

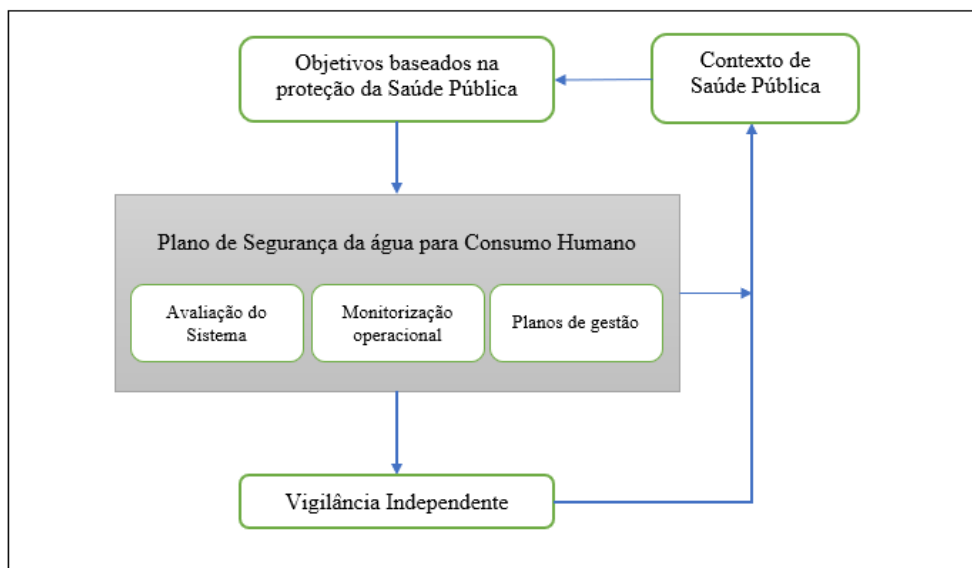
As investigações epidemiológicas desenvolvidas por John Snow, que evidenciam uma íntima ligação entre o consumo de água com contaminação fecal e um surto de cólera em Londres (Snow, 1855), e as inovações científicas no avanço dos métodos de deteção de microrganismos desenvolvidas por Robert Kock em 1883 (Gradmann, 2001), constituíram algumas das bases científicas determinantes na relação do consumo de água com a saúde pública.

Neste contexto, a água e a saúde pública são inseparáveis. A água é essencial à vida humana e, enquanto produto de higiene, previne o desenvolvimento e elimina microrganismos perigosos à saúde humana. No entanto, ainda existem vários casos em que a água contém substâncias químicas, provenientes de origens industriais e agrícolas, que ao longo do tempo provocam problemas de saúde, e por esse motivo, o aspeto, o sabor e o cheiro da água nem sempre traduzem, só por si, qualidade de excelência.

A qualidade da água potável pode ser controlada através de uma combinação de métodos de proteção dos recursos hídricos, controlo de processos de tratamento e gestão de distribuição da água. Deve apontar-se para uma distribuição ao nível regional ou local, o que requer adaptação a questões ambientais, sociais, circunstâncias económicas e culturais e estabelecimento de prioridades. (Instituto Português da Qualidade, 1999)

A Organização Mundial de Saúde (OMS), através de uma edição de 2004 de “Guidelines for Drinking-water Quality” recomenda que as entidades gestoras de sistema de abastecimento público de água criem e melhorem planos de segurança de forma a assegurar a qualidade de água, incorporando metodologias de avaliação e gestão de riscos, assim como práticas de boa operação dos sistemas (WHO, 2004). É proposto um plano que incorpore a aplicação de um Plano de Segurança de Água e a conformidade de padrões de qualidade (Tabela 1)

Tabela 1 –Referência para o estabelecimento de segurança da qualidade de água (adotado de (WHO, 2004))



As entidades gestoras dos sistemas de abastecimento de água (SAA) são responsáveis pelo transporte da água dentro de condutas e reservatórios. O material utilizado na construção dos reservatórios pode ser de betão, blocos de cimento ou alvenaria de tijolo, aço ou qualquer outro material que seja devidamente apropriado para a preservação da água armazenada, tendo em consideração que os revestimentos utilizados não devem prejudicar nem alterar a qualidade da água (Sá, 2012).

Por vezes, a qualidade da água pode ser alterada ao longo do tempo de vida das infraestruturas. Também na fase de dimensionamento, é fundamental ter em consideração as velocidades de escoamento pois se estas forem demasiado baixas, terão influência no desenvolvimento e evolução de microrganismos prejudiciais à saúde pública. Por este motivo, devem evitar-se zonas de estagnação nos reservatórios, condutas sobredimensionadas ou condutas que terminam em juntas cegas (Insituto Português da Qualidade, 1999).

2.3. SEDIMENTAÇÃO NAS ALBUFEIRAS

A acumulação de sedimentos em albufeiras é um problema complexo que é necessário encarar desde logo na fase de dimensionamento. As albufeiras retêm uma quantidade significativa do fluxo sedimentar e essa mudança dinâmica requer uma abordagem de engenharia complexa e apresenta efeitos ambientais. Além do efeito direto de uma perda considerável na capacidade do reservatório, a retenção de sedimentos nas albufeiras pode ter como consequência a acumulação e armazenamento de químicos compostos que contêm carbono, por tempo indeterminado (Mulholland e Elwood, 1982).

As taxas de acumulação de compostos de carbono nos sedimentos podem estar relacionadas com os caudais de escoamento e tempos de residência em cada sistema hidráulico, como os rios, albufeiras ou lagos (Figura 2). Na realidade, o comportamento destes sistemas, frequentemente dominados por grandes bacias hidrográficas, e associados a escoamentos superficiais são bastantes dependentes do tempo de residência da água.

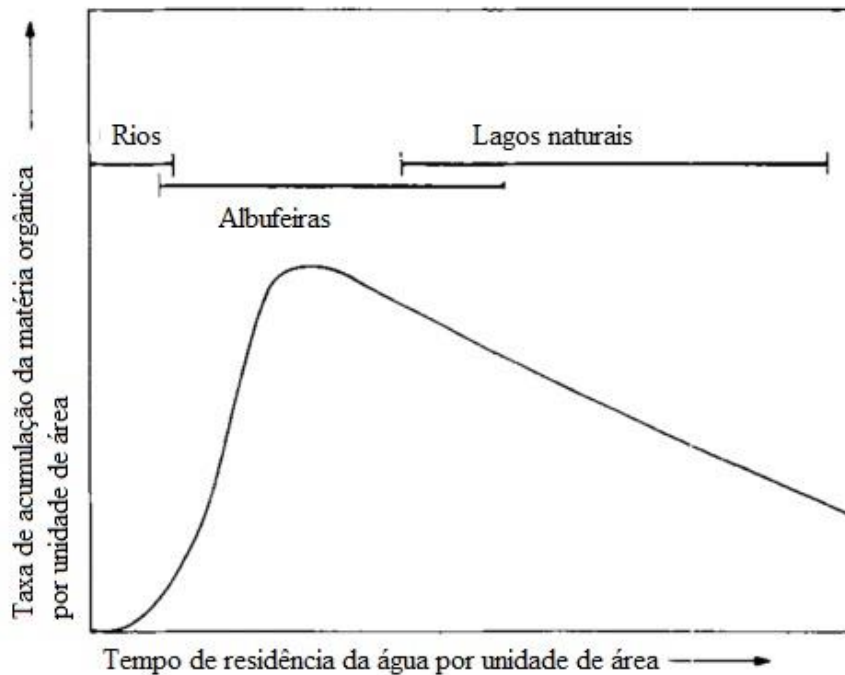


Figura 2 – Relação entre a taxa de acumulação da matéria orgânica com o tempo de residência da água (Mulholland e Elwood, 1982)

Neste contexto, assumem relevância em efeitos ecológicos, incluindo a eutrofização e as perdas de habitat (Hargrove *et al.*, 2010), alterações morfológicas (Araújo, Güntner e Bronstert, 2006) e os efeitos decorrentes da gestão operacional de aproveitamentos de produção de energia hidroelétrica (Graf *et al.*, 2010).

Frequentemente, o problema da sedimentação ocorre mais rapidamente que a perda de integridade da própria estrutura, sendo que, o tempo de vida e a sustentabilidade acabam por ser controladas pela sedimentação. As barragens são planeadas e projetadas para operarem por um tempo limitado de vida, em certos casos tão baixos quanto 100 anos (Morris e Fan, 1998). Hargrove *et al.* (2010) observaram muitas das albufeiras situadas nos Estados Unidos da América, projetadas para operarem entre 150 a 200 anos. Devido à formação da sedimentação (Figura 3), o tempo de vida reduziu para 50 a 100 anos, com a consequente perda de armazenamento.



Figura 3 – Esquema típico de deposição dos sedimentos nas albufeiras. (adaptado de (Lameiro, 2009))

As taxas de sedimentação são, em relação à capacidade projetada, estritamente específicas da zona em que se encontram, e controladas por vários fatores locais. Wang e Hu (2009), estimaram que a sedimentação provocou um decréscimo incomum de 66% da capacidade total de uma albufeira na China, enquanto que Minear e Kondolf (2009), constatarem uma diminuição da capacidade das albufeiras em toda a região da Califórnia em 4,5%. Neste contexto, entende-se que o volume total perdido pela sedimentação é deveras incerto, variando zonalmente, tendo em consideração que a perda de armazenamento não é globalmente idêntica.

2.4. PREENCHIMENTO DE FALHAS EM SÉRIES DE PRECIPITAÇÃO

Sendo um parâmetro climático de importância extrema, a precipitação deverá, assim, ser um fator relevante a considerar no planeamento urbanístico, pelo condicionamento que impõe às vivências urbanas (Branco *et al.*, 2010). É reconhecida a influência e representatividade que a precipitação possui em qualquer estudo hidrológico.

A ausência de dados climatológicos é uma das grandes limitações e condicionante da qualidade da base de estudo. Nesta secção pretende-se abordar alguns métodos utilizados para preenchimento de falhas em séries de precipitação.

2.4.1. REGRESSÃO LINEAR OU MÉTODO DAS DUPLAS ACUMULAÇÕES

O método da regressão linear ou método das duplas acumulações, destaca-se devido à sua simplicidade, pois apenas intervêm os valores de precipitação de dois postos, em que se avalia a correlação entre as precipitações em falta e a precipitação de outro posto com características similares a uma dada escala temporal (Vaz, 2010). Permite detetar erros sistemáticos e estimar o valor absoluto do erro, deduzindo valores médios das séries pluviométricas incompletas. A sua finalidade passa por obter valores pontuais de série, por interpolação ou extrapolação (Maia, 2015).

Consideram-se as estações hidrológicas para aplicação do método, sendo geradas a partir das correspondentes séries de precipitação (Tabela 2), séries de valores acumulados (Tabela 3).

Tabela 2 - Séries de valores de precipitações (Maia, 2015)

Anos	Série P	Série P'
Ano 1	P1	P'1
Ano 2	P2	P'2
Ano 3	P3	P'3
.	.	.
.	.	.
.	.	.
Ano n	Pn	P'n

Tabela 3 - Séries de valores de precipitações acumuladas

Anos	Série x	Série y
Ano 1	$x_1=P_1$	$y_1=P'_1$
Ano 2	$x_2=P_1+P_2$	$y_2=P'_1+P'_2$
Ano 3	$x_3=P_1+P_2+P_3$	$y_3=P'_1+P'_2+P'_3$
.	.	.
.	.	.
.	.	.
Ano n	$x_n=\sum P_i$	$y_n=\sum P'_i$

As coordenadas de valores $(x_i; y_i)$ são demonstradas num sistema de eixos, constituindo uma nuvem de pontos, à qual se ajusta uma reta do tipo: $y = mx + b$ (Figura 4).

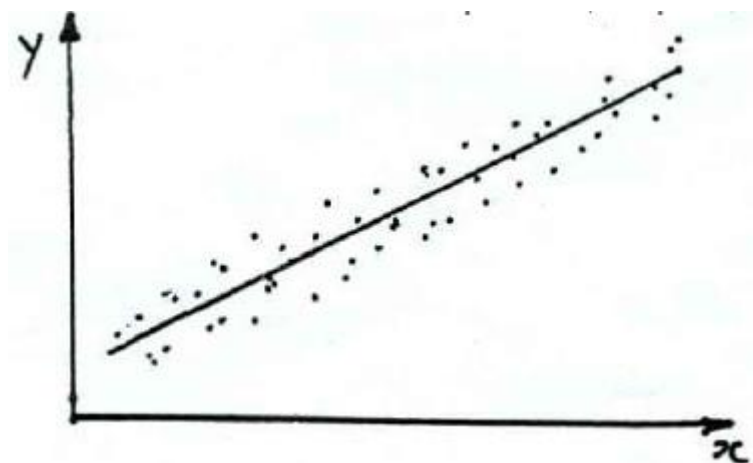


Figura 4 - Determinação da reta do tipo $y=mx+b$, resultante dos valores acumulados (Maia, 2015)

Após aplicar sucessivamente este método às séries de registos de precipitações totais, define-se a regressão linear para cada posto, e consequentemente rejeitam-se os postos que evidenciem um coeficiente de correlação (R^2) inferior. Adota-se para posto modelo, o posto que demonstre um coeficiente de correlação superior (Maia, 2015).

2.4.2. MÉDIA PONDERADA

O método proposto pelo United States Weather Bureau (U.S.W.B) determina o valor da precipitação pretendida a partir do valor médio em três postos vizinhos (Chow, 1964), através da equação 2.1:

$$P_y = \frac{M_y}{3} \left(\frac{P_1}{M_1} + \frac{P_2}{M_2} + \frac{P_3}{M_3} \right) \quad (2.1)$$

Sendo que:

- P_y – Precipitação a ser estimada para o posto com falha;
- P_1, P_2, P_3 – Precipitações correspondentes dos postos vizinhos, ao mês ou ano que se deseja preencher;
- M_y – Precipitação média do posto com falha;
- M_1, M_2, M_3 – Precipitações médias dos três postos vizinhos.

Este método é empregue ao preenchimento de falhas de precipitações de séries mensais ou anuais, e fundamenta-se com base em, pelo menos, três estações climaticamente homogêneas, preferencialmente idênticas no tipo de características.

2.5. MÉTODOS DE CÁLCULO DA EVAPORAÇÃO

A avaliação da evaporação a partir de superfícies de cariz hídrico foi alvo de múltiplas observações ao longo dos anos. Muitos autores examinaram esta problemática sob inúmeros aspetos.

Os primeiros fundamentos sobre a evaporação nascem na Grécia pré-filosófica, por volta do século vinte antes de Cristo. Concedem-se a Hesíodo as primeiras referências a este fenómeno quando mencionou a relevância em apresentar o conceito de ramo aéreo do ciclo hidrológico e uma relação da evaporação com o vento (Brutsaert, 1982). A partir do início do século passado, a quantificação das perdas de água proveniente dos armazenamentos naturais ou artificiais, evidenciou uma maior importância.

Devido à sua essência, o cálculo da evaporação de superfícies de água é raramente executado de forma direta (Jones, 1992). Por esse motivo, a escolha de um método destinado a quantificar a perda de água proveniente da evaporação é dependente de fatores como: rigor que se pretenda obter; exatidão da instrumentação empregue; e, da quantidade e qualidade dos dados históricos que se encontram disponíveis. Vardavas e Fountoulakis (1996) estudaram os efeitos da utilização de mais de que um método de cálculo da evaporação em quatro albufeiras australianas, retirando boas indicações do resultado apontado.

A opção de eleger apenas um método empírico destinado ao cálculo da evaporação de uma determinada albufeira, fornece com pouca garantia a obtenção dos resultados fiáveis se não for aplicado um método de comparação credível. Ao longo de muitos anos, foram desenvolvidos inúmeros métodos para estimar

a evaporação. Procede-se à enumeração dos métodos mais importantes e amplamente desenvolvidos segundo a seguinte ordem:

1. Balanço Volumétrico (balanço de massa ou balanço hídrico);
2. Balanço Energético (ou balanço térmico);
3. Transferência de massa (ou aerodinâmico);
4. Combinado (ou balanço energético + aerodinâmico).

2.5.1.MÉTODO DO BALANÇO VOLUMÉTRICO

Corresponde à determinação da evaporação através das principais componentes hidrológicas e das características fisiográficas. Basicamente, fundamenta-se no ciclo da água e no princípio da conservação da massa aplicado a um volume de controlo (Finch e Calver, 2008). É então exequível definir a equação do balanço volumétrico (equação 2.2), aplicado a um corpo de água num delimitado período de tempo.

$$\frac{dV}{dt} = \sum_i Q_i + AI_p - AE_l \quad (2.2)$$

Onde, V é o volume de água armazenada, t é o período de tempo em análise, Q_i corresponde ao caudal afluente na fronteira do volume de controlo, proveniente do escoamento superficial e subterrâneo, podendo assumir um valor positivo ou negativo, conforme corresponda à entrada ou saída de, respetivamente, do volume de controlo, I_p representa a precipitação direta na superfície livre, A retrata a área média do espelho de água e, por último, E_l demonstra o valor da evaporação da albufeira por unidade de área.

Não obstante à simplicidade da utilização deste método para determinar o volume evaporado, é necessário ter em consideração que o mesmo requer o conhecimento e monitorização precisa das variáveis constituintes. A complexidade de quantificar precisamente algumas dessas variáveis, especialmente relativas ao escoamento subterrâneo, torna o processo incerto. Conforme referiu Bras (1990), as estimativas mensais são normalmente afetadas pela imprecisão da quantificação dos valores sazonais das variáveis utilizadas.

2.5.2.MÉTODO DO BALANÇO ENERGÉTICO

A origem conceptual do balanço energético ou balanço térmico (Figura 5) é revelada por Schmit, em 1915, quando o mesmo apresenta o primeiro cálculo da evaporação nos oceanos. Igualmente, Angström, por volta do ano de 1920, foi um inovador na aplicação deste método para a estimativa da evaporação em grandes superfícies de água (Brutsaert, 1982). A partir deste período, o método do balanço energético foi testado inúmeras vezes em casos de determinação da evaporação em lagos, ao qual acabou por lhe ser conferido como o método mais robusto e exato (Rosenberry *et al.*, 2007)

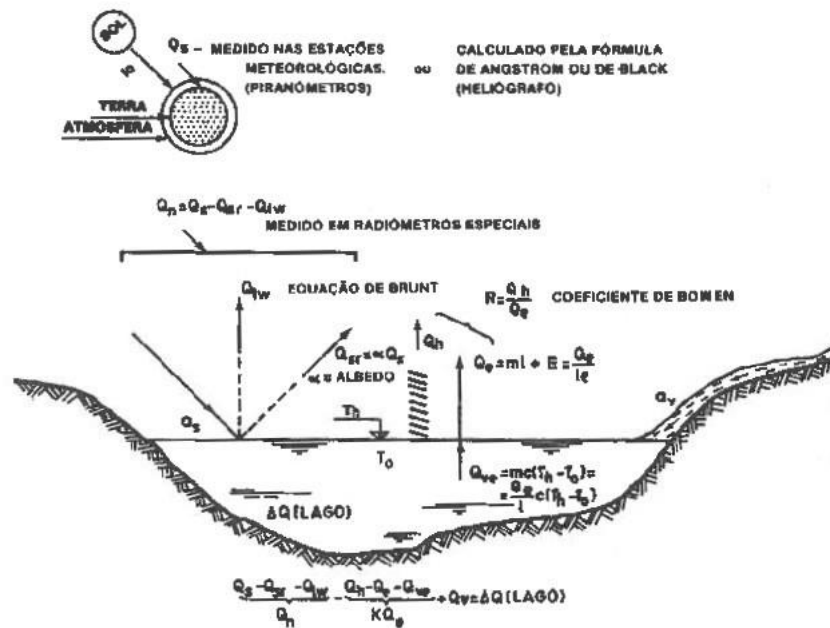


Figura 5 - Esquema do balanço energético. (Lencastre e Branco, 2010)

É considerado um método bastante complexo devido à sua avaliação dos seguintes fluxos energéticos: radiação solar; energia armazenada; trocas de energia entre a água e o ar, e a água e o solo; energia consumida no seguimento do processo de evaporação. Tem por base algumas variáveis utilizadas no método do balanço volumétrico como os caudais de entrada e saída e ainda o volume de armazenamento, uma vez que afetam o balanço energético.

Partindo do princípio que a superfície de água se encontra em equilíbrio, a equação de balanço energético (equação 2.3), pode ser descrita por:

$$Q_n - G = LE + H \quad (2.3)$$

Em que, Q_n representa o fluxo de radiação líquida de curto e longo comprimento de onda, G corresponde ao fluxo vertical de calor, H expressa o fluxo de calor sensível vindo da superfície e por último, LE aponta ao fluxo de calor latente, e representa a energia usada para a evaporação dada por $LE = \rho_w \lambda E$, onde, ρ_w é a massa volúmica da água, λ é o calor latente da vaporização e E é a intensidade de evaporação.

Respeitando a um modo mais complexo do balanço energético aplicado a um corpo de água revelado por (Sene, Gash e McNeil, 1991), considera-se a variação da energia armazenada na massa de água (dQ_w/dt), o fluxo energético líquido por advecção resultante dos volumes de água subtraídos ou acrescentados ao sistema (Q_v), o fluxo energético líquido por condução na relação água-sedimentos (Q_b) e a energia transferida pela massa de água através da água evaporada (Q_{ev}), a equação do balanço energético é dada por:

$$\frac{dQ_w}{dt} = Q_n - LE - H + Q_v - Q_h - Q_{ev} \quad (2.4)$$

A determinação do fluxo de energia da água para o solo, Q_b não é de todo um processo facilitado devido à convecção resultante dos gradientes térmicos que se criam na relação água-solo. Igualmente de difícil determinação, o fluxo de calor sensível nas condições fronteira (Bowen, 1926), propôs um método indireto destinado ao cálculo da repartição entre o fluxo de calor sensível, H e o fluxo de calor latente, LE , traduzindo nas seguintes equações:

$$H = -\rho_a c_a K_H \frac{dT_a}{dz} \quad (2.5)$$

$$LE = -\rho_a \lambda K_V \frac{dq}{dz} \quad (2.6)$$

Em que, c_a é o calor característico do ar a pressão constante, ρ_a é a massa volúmica do ar, K_H é o coeficiente de difusão turbulenta para o calor e K_V o coeficiente de difusão turbulenta para o vapor de água, T_a é a temperatura ambiente do ar, q representa a humidade específica, z aponta a dois níveis de alturas z_1 e z_2 , e correspondem a alturas acima da superfície evaporante (geralmente consideradas a cerca de 2 metros do solo) e λ é o calor latente de vaporização.

Ignorando numa fase posterior, covariâncias entre a velocidade do vento e as diferenças de vapor de água e temperatura e que os gradientes de humidade (dq/dz) e de temperatura (dT_a/dz) se podem aproximar pelas diferenças de q e de T_a , a dois níveis de alturas z_1 e z_2 , define-se a razão de Bowen, β , determinado como o rácio entre o fluxo de calor sensível pelo fluxo de calor latente expresso por:

$$\beta = \frac{H}{LE} = \frac{c_a K_H (T_{a1} - T_{a2})}{\lambda K_V (q_1 - q_2)} \quad (2.7)$$

De outro modo, pode-se considerar utilizar as diferenças de tensões de vapor entre a superfície de água e o ar, em vez da utilização das humidades específicas, podendo igualmente referenciar a semelhança entre os coeficientes de difusão turbulenta para o calor e para o vapor de água ($K_H \approx K_V$) (Bowen, 1926), resultando:

$$\beta = \gamma \frac{(T_s - T_a)}{(e_s - e_a)} \quad (2.8)$$

Onde, $(T_s - T_a)$ representa a diferença de temperaturas entre, respetivamente a superfície da água e o ar, γ aponta à constante psicrométrica, aproximadamente $0,66 \text{ hPa K}^{-1}$ ou poderá ser calculada da seguinte forma (Brutsaert, 2005):

$$\gamma = \frac{c_a p}{\lambda \varepsilon} \quad (2.9)$$

Em que, ε representa o quociente entre as massas molares do vapor de água e do ar seco e, p corresponde à pressão atmosférica.

(Priestley e Taylor, 1972) referiram que seria importante a igualdade entre os coeficientes de difusão turbulenta para o calor e para o vapor de água, e que a equação simplificada (2.7) de Bowen só poderia ser aplicada à condição ($K_H \approx K_V$).

A determinação da evaporação numa albufeira através da razão de Bowen é exequível posto que estejam reunidos todos os valores das variáveis intervenientes. Se assim o for, a intensidade da evaporação é conseguida na combinação de duas equações que serão abordadas ao longo deste trabalho.

2.5.3.MÉTODO DE TRANSFERÊNCIA DE MASSA

Este método desenvolve-se sob o cálculo da quantidade de vapor de água que é transferido para o exterior da superfície líquida, tendo em consideração que o principal fator de proporcionalidade é a ação do vento. Nesta metodologia, a evaporação é tratada em função da velocidade do vento e pelo défice de saturação, correspondente à diferença entre a tensão de saturação do vapor de água na superfície líquida e a tensão de vapor efetiva. Dalton, em 1802, propôs uma relação destinada ao cálculo da evaporação, E , de uma superfície de água (Lencastre e Branco, 2010):

$$E = Cf(u)[e_w(T_s) - e(T_a)] \quad (2.10)$$

Onde, C é uma constante experimental, $f(u)$ representa uma função da velocidade do vento, normalmente medida a 2 metros do solo, $e_w(T_s)$ corresponde à tensão do vapor saturado da superfície evaporante, e $e(T_a)$ à tensão de vapor na atmosfera, à temperatura T_a .

A velocidade do vento foi a variável que mais suscitou interesse, e por esse motivo, foram propostas diversas definições de diferentes autores ao longo do tempo. Aliás, segundo a equação (2.10) em cima descrita, a evaporação só ocorre na existência de vento. Após várias experiências sobre que convecção seria mais indicada, conclui-se que função característica do vento se apresenta na forma:

$$f(u) = a + bu^n \quad (2.11)$$

Onde a , b e n são constantes empíricas obtidas por regressão, em que ambos os processos de convecção (livre e forçada) são tidos em consideração. Estas constantes são dependentes das condições de cada local (Brutsaert, 1982).

A complexidade da aplicação deste método reside fundamentalmente na determinação da temperatura da superfície evaporante, sobretudo se a temperatura da água e a temperatura do ar apresentarem uma diferença significativa entre elas (Lencastre e Branco, 2010).

2.5.4.MÉTODO COMBINADO

2.5.4.1.Fórmula de Penman

Nos últimos cinquenta anos, a fórmula amplamente mais utilizada para estimar a evaporação da água ou da vegetação foi a equação de Penman. É empregue essencialmente em casos a desenvolver para períodos superiores a 20 dias, em lagos ou albufeiras pouco profundas, e com temperatura constante,

desprezando as variações de energia armazenada na água (Penman, 1948). O balanço de energia pode então, face a estes desenvolvidos ser descrito da seguinte forma:

$$H = Q_n - LE \quad (2.12)$$

Determinado em transpor as limitações rigorosas observadas na obtenção de diversas variáveis necessárias ao cálculo do coeficiente de Bowen, Penman (Penman, 1948) sugeriu excluir a precisão de dados respeitantes à temperatura superficial da água, definindo um declive Δ , relacionado com a variação da tensão de vapor saturado em função da temperatura do ar, expresso por:

$$\Delta = \frac{e_a^* - e_d}{T_a - T_d} \quad (2.13)$$

Em que, Δ assume o declive da curva de tensão de vapor para a temperatura média do ar, e_a^* e e_d em (kPa) são, respetivamente, a tensão de saturação de vapor à temperatura média do ar (T_a) e à temperatura do ponto de orvalho (T_d).

Apresentou assim, uma demonstração de cálculo da evaporação que combina o método energético com o método aerodinâmico, dado por

$$\lambda E = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} Q_n + \frac{\gamma}{\gamma + \Delta} \lambda E_a \quad (2.14)$$

Onde

$$\lambda E_a = 6.43 f(u) (e_a^* - e_d) \quad (2.15)$$

Em que, λ é o calor latente de vaporização (MJ.kg^{-1}), λE o calor latente de evaporação (MJ.kg^{-1}), Q_n corresponde ao fluxo de radiação líquida ($\text{MJ.m}^2.\text{dia}^{-1}$), γ é a constante psicrométrica ($\text{kPa.}^\circ\text{C}^{-1}$), e E_a refere o valor da evaporação em (mm/dia), já anteriormente definido sob cariz aerodinâmico.

(Shuttleworth, 1994) recomendou que, para além das inúmeras teorias envolventes à velocidade do vento, deve ser utilizada a seguinte expressão para a função do tempo

$$f(u) = (1.0 + 0.537 u_2) \quad (2.16)$$

Em que u_2 corresponde à velocidade do vento a 2 metros da superfície evaporante e as restantes variáveis têm o significado e as unidades já anteriormente referidos.

2.6. DIMENSIONAMENTO DA CAPACIDADE ÚTIL DAS ALBUFEIRAS

2.6.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

A inconstância temporal dos recursos hídricos, especialmente do escoamento superficial, torna vital a conceção de albufeiras artificiais que assegurem o armazenamento de água. O objetivo principal destas albufeiras passa por armazenar o excesso de água durante os períodos de escoamentos elevados para reforçar nos períodos de estiagem – regularização intra-anual (Vaz, 1984).

No dimensionamento de uma albufeira artificial, decorrente da construção de uma barragem, é essencial determinar o volume de armazenamento, de modo a garantir as necessidades de consumo. O processo de determinação da capacidade considera, em geral, três parcelas distintas na vida útil de uma barragem. A primeira parcela corresponde ao volume morto, estabelecido como o volume onde ficam depositados os sedimentos que sofrem arrastamento do rio. A segunda parte corresponde à capacidade útil, que devem atender aos diferentes usos que se realizam a partir da albufeira. A terceira e última parcela, refere-se a uma reserva de volume para controlo de cheias, que tem como propósito permitir o amortecimento das cheias. Caso não exista o amortecimento de cheia, a onda de cheia descarregada por intermédio do descarregador coincide com a onda de cheia de projeto afluente (Vaz e Hipólito, 2011).

Os valores de escoamentos afluentes são um parâmetro extremamente relevante no processo do dimensionamento da albufeira. A capacidade útil de uma albufeira é dimensionada de acordo com os mesmos, atentam as utilizações e necessidades a que está sujeita. Reconhece-se que a capacidade útil depende de valores e padrões temporais, séries de escoamento afluentes, e utilizações e necessidades a que se objetiva (Martins, 2016).

Klemeš (1987), questionou-se sobre qual a dimensão que uma albufeira, alimentada por um ou vários cursos de água naturais, deve ter de modo que assegure o fornecimento que é devidamente exigido. Obviamente que a maior importância corresponde em garantir que a quantidade de água a fornecer seja inferior ao escoamento afluente, visto que a albufeira não pode fornecer mais água do que recebe. É necessário que se conheçam os escoamentos, e os padrões associados às correspondentes séries temporais. O autor apresentou uma abordagem determinística tendo em conta que, os escoamentos futuros desconhecidos serão determinados com base nos escoamentos passados, assumindo que seguirão a tendência dos valores decorridos.

Ao longo dos anos mais recentes, vários métodos fundamentados na abordagem determinística – como o método de Rippl, o método da curva acumulada dos escoamentos, o método da curva residual acumulada e o método do pico sequencial (Martins, 2016) – conduziram a uma análise pormenorizada.

Segundo McMahon e Adeloye (2005) a solução do problema de armazenamento de uma albufeira depende de vários fatores, como a variação do escoamento, o valor da procura e o desempenho da albufeira face ao desejado por essa procura. Embora possa ser equacionado de várias maneiras, tal pode ser sintetizado como correspondido a um problema básico: constatar uma relação entre as características do escoamento afluente, a capacidade da albufeira, a libertação dos caudais e o desempenho desejado. Os métodos adotados a estimar uma solução de armazenamento de albufeiras são denominados como procedimentos de armazenamento-rendimento (“storage-yield procedures”).

2.6.2. MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DA CAPACIDADE DE UMA ALBUFEIRA

Visando a determinação correta da capacidade útil de uma albufeira, foram surgindo diferentes procedimentos de forma a satisfazer a procura desejada. McMahon e Adeloye (2005) recomendaram a classificação dos mesmos em três grupos:

- Período crítico (Critical period);
- Métodos probabilísticos (Probability matrix methods);
- Métodos baseados na geração de séries de escoamento (Procedures based on generated synthetic data).

O período crítico pode ser definido como um período no qual a albufeira passa do estado cheio para o estado vazio sem que suceda qualquer tipo de descarga durante o mesmo (McMahon e Adeloey, 2005). Os métodos englobados neste grupo assentam o cálculo da capacidade útil de uma albufeira na diferença entre a quantidade de água descarregada, e as afluições na mesma (Martins, 2016). McMahon *et al.* (2007) indicou que os métodos mais utilizados no dimensionamento da capacidade da albufeira – métodos da curva acumulada e o método da simulação – pertencem a este grupo.

Desenvolvidos com base na teoria de Moran (Moran, 1959), “os métodos probabilísticos pretendem determinar a distribuição do armazenamento diretamente da estrutura probabilística do modelo de escoamento (...)” (Guimarães, 2005).

Os métodos baseados na geração de séries de escoamento utilizam os métodos dos outros dois grupos, assumindo como distinção o recurso adicional a séries sintéticas de escoamento, produzidas a partir de modelos matemáticos estocásticos.

2.6.2.1. Métodos da curva acumulada

Os métodos da curva acumulada foram originalmente desenvolvidos como métodos gráficos que utilizavam curvas de escoamentos acumulados durante uma série temporal para determinar a capacidade de armazenamento de uma albufeira. O método inicialmente introduzido por Rippl (1883), marcou o início das rigorosas teorias sobre o armazenamento das albufeiras (Klemeš, 1987) (McMahon *et al.*, 2007). Os métodos da curva acumulada apresentados neste trabalho são os seguintes:

- Método de Rippl;
- Método da curva acumulada dos escoamentos;
- Método da curva residual acumulada;
- Método do pico sequencial.

O objetivo dos métodos da curva acumulada é essencialmente determinar a capacidade útil mínima de armazenamento, C , primordial para assegurar a satisfação da procura, D , a partir de uma albufeira para a qual é conhecida a série de volumes afluentes, Q , ao longo de N anos. Os métodos acima referidos, possuem, dois princípios de base. O primeiro baseia-se na hipótese de considerar que a albufeira se encontra cheia no instante inicial ($t = 0$). O segundo consiste em reconhecer que a série histórica é representativa das possíveis séries futuras.

Em seguida, é apresentado e descrito todo o procedimento utilizado nos métodos mencionados, assente no trabalho desenvolvido por (Guimarães, 2005).

a) Método de Rippl

Como anteriormente apontado, Rippl (1883) permitiu um desenvolvimento considerável ao introduzir o método pioneiro para a determinação da capacidade útil do reservatório. No momento da sua publicação, os cálculos numéricos eram feitos manualmente, e por isso os métodos gráficos eram a principal

ferramenta para aumentar a eficiência computacional. Tem por base o seguinte procedimento (Figura 6):

1. Traçar a curva acumulada das diferenças entre as afluências, X_t , e as efluências, Q_t , (Curva residual acumulada de Rippl), para um determinado período de tempo, t , evidenciada na seguinte equação (2.17):

$$\sum (X - Q) = \sum_{t=1}^T (X_t - Q_t), \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (2.17)$$

2. Identificar o primeiro mínimo local da curva acumulada, m_1 , partindo do trecho final da curva;
3. Identificar o seguinte mínimo local, m_2 , considerando que este deve ser menor que o anterior ($m_1 > m_2$);
4. Identificar o máximo local, M_1 , entre os dois mínimos, m_1 e m_2 , e calcular a diferença ($D_1 = M_1 - m_1$);
5. Repetir os passos 2 a 4 até o início da curva ser alcançado;
6. Calcular a capacidade útil de armazenamento como $C = \max(D_p)$, com $p = 1, 2, \dots, P$, onde P é o número total de mínimos locais.

A maior desvantagem do método de Rippl é que necessário proceder-se a um novo traçado da curva acumulada dos resíduos sempre que a procura sofre alterações.

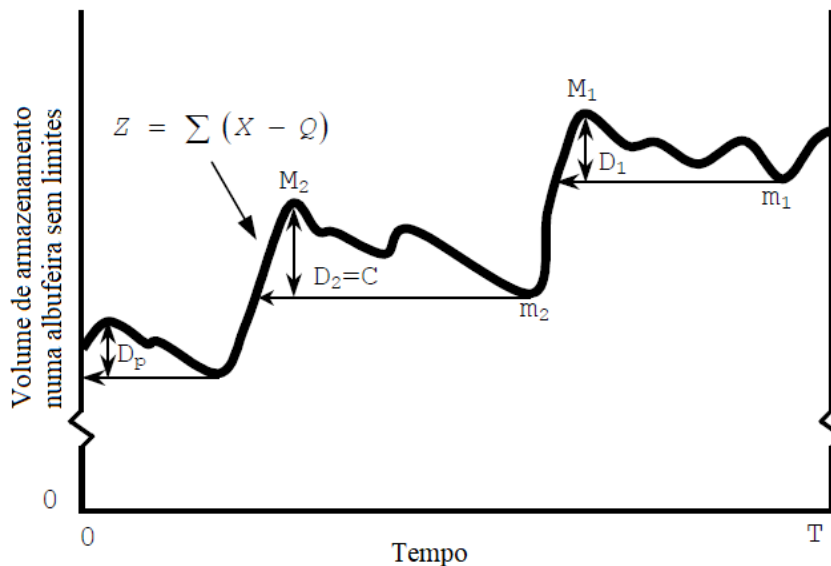


Figura 6 - Método de Rippl. Determinação da capacidade útil (C) necessária a satisfazer as exigências desejadas (Q), a partir de uma albufeira alimentada por uma dada série de escoamentos afluentes (X). Adotado de (Guimarães, 2005)

b) Método da curva acumulada dos escoamentos

O método da curva acumulada dos escoamentos consiste no desenvolvimento do traçado da curva acumulada das afluências juntamente com a reta do consumo acumulado, correspondendo o volume de armazenamento à maior diferença entre estas duas (Figura 7). Representa o seguinte procedimento:

1. Traçar a curva acumulada das afluências – equação (2.18):

$$\sum X = \sum_{t=1}^T X_t, \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (2.18)$$

2. Traçar o segmento de reta da procura (consumo), que neste caso, é admitido constante ao longo do tempo – equação (2.19):

$$\sum Q = \sum_{t=1}^T Q_t, \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (2.19)$$

3. Traçar retas paralelas ao segmento de reta da procura, tangentes nos pontos máximos e mínimos locais da curva acumulada das afluências;
4. Medir as diferenças entre as paralelas sucessivas do tipo máximo-mínimo;
5. Determinar a capacidade útil da albufeira que corresponde à máxima diferença medida no último passo.

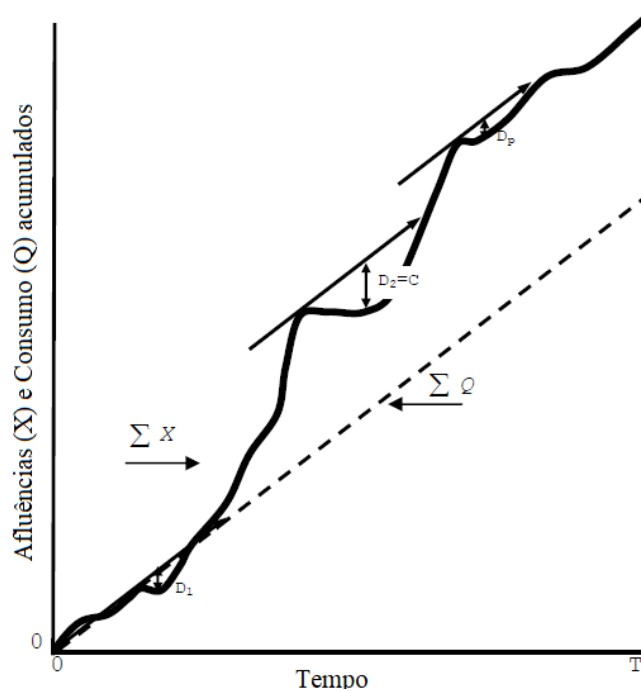


Figura 7 - Método da curva acumulada dos escoamentos. Determinação da capacidade útil (C) necessária para satisfazer as exigências desejadas (Q), a partir de uma albufeira alimentada por uma dada série de escoamentos afluentes (X). Adaptado de (Guimarães, 2005)

c) Método da curva residual acumulada

O método da curva residual acumulada nasce após Hazen (1914), verificar que a aplicação do método de Rippl se tornava impraticável pelo facto de o crescimento da curva acumulada trazer problemas

gráficos. Efetivamente, a técnica proposta por Rippl tem a grande desvantagem em recomençar o seu desenvolvimento, sempre que o consumo é alterado (Guimarães, 2005)

O método da curva residual acumulada, surge com a substituição da curva residual original pela curva residual calculada em relação à média da série de afluências (Figura 8), proposta por Sudler em 1927 (Silva, 2010). Assim, procede-se ao cálculo da capacidade útil através do seguinte procedimento:

1. Traçar a curva residual acumulada, a qual é obtida através da subtração do volume médio afluente a cada valor de escoamento – equação (2.20):

$$\sum (X - \bar{X}) = \sum_{t=1}^T (X_t - \bar{X}), \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (2.20)$$

2. Traçar o segmento de reta correspondente ao pedido residual acumulado, o qual se obtém da subtração do volume médio afluente a cada valor de consumo – equação (2.21):

$$\sum (Q - \bar{X}) = \sum_{t=1}^T (Q_t - \bar{X}), \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (2.21)$$

3. Traçar retas paralelas ao anterior segmento de reta, tangentes nos pontos máximos e mínimos locais da curva residual acumulada das afluências e medir as diferenças entre paralelas sucessivas;
4. Definir a capacidade útil da albufeira, correspondente à maior das diferenças entre paralelas.

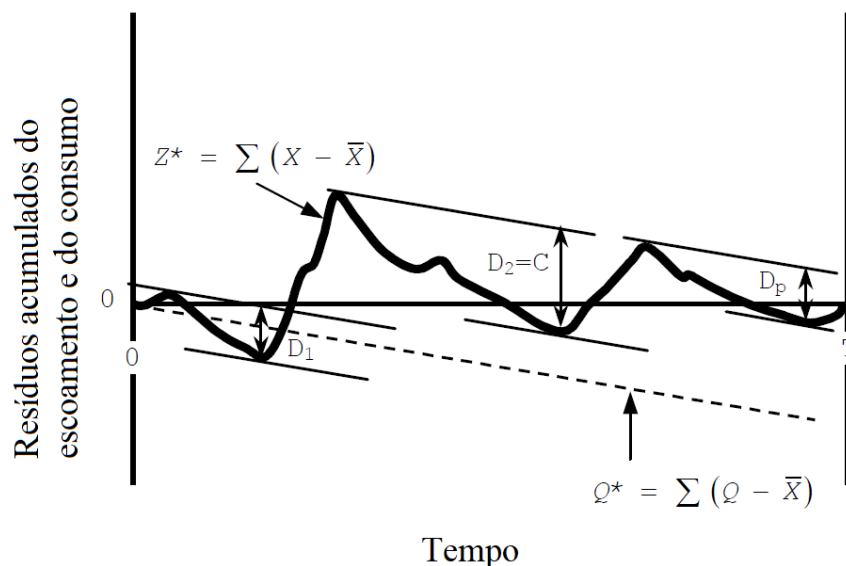


Figura 8 - Método da curva acumulada residual acumulada. Determinação da capacidade útil (C) necessária para satisfazer as exigências desejadas (Q), a partir de uma albufeira alimentada por uma dada série de escoamentos afluentes (X). Adaptado por (Guimarães, 2005)

d) Método do pico sequencial

O método do pico sequencial foi proposto por Thomas e Burden (1982), é relativamente semelhante ao método de Rippl, sendo que neste caso, procede-se à identificação dos máximos locais, em vez dos mínimos (Figura 9). O seu procedimento consiste no seguinte:

1. Traçar a curva acumulada dos resíduos, que corresponde à diferença entre o escoamento afluente e o consumo – equação (2.22):

$$\sum (X - Q) = \sum_{t=1}^T (X_t - Q_t), \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (2.22)$$

2. Começando no início do trecho, identifica-se o primeiro máximo local, M_1 .
3. Identificar o segundo máximo local, M_2 .
4. Identificar o mínimo local, situado entre os dois máximos locais, M_1 e M_2 , e calcular a diferença $D_1 = (M_1 - m_1)$.
5. Repetir os passos 2 a 4 sucessivamente até o final do trecho ser alcançado.
6. Calcular a capacidade útil, indicando que $C = \max(D_p)$, com $p = 1, 2, \dots, P$, em que P corresponde ao número total de mínimos locais.

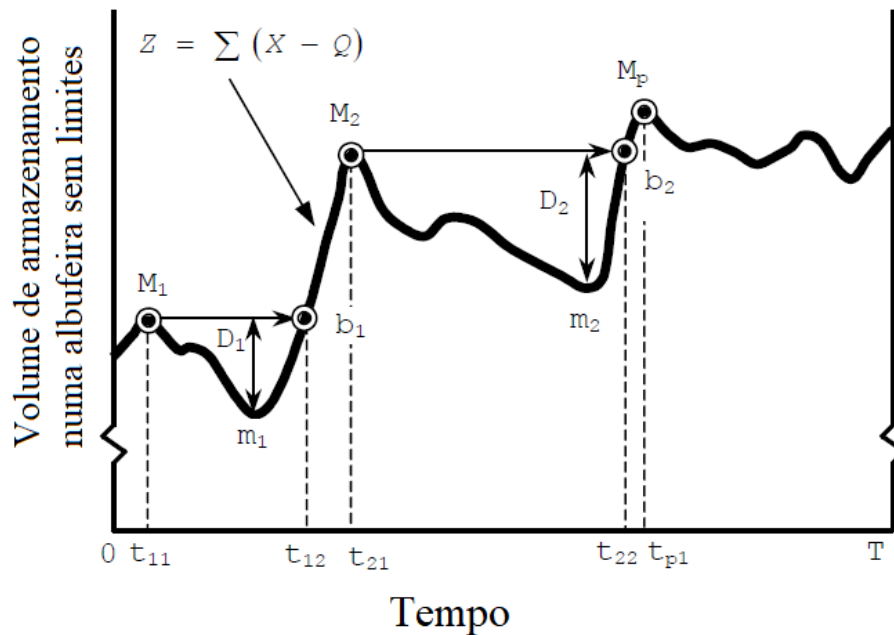


Figura 9 - Método do pico sequencial. Determinação da capacidade útil (C) necessária para satisfazer as exigências desejadas (Q), a partir de uma albufeira alimentada por uma dada série de escoamentos afluentes (X). Adaptado por (Guimarães, 2005)

e) Método da simulação

Identicamente ao que acontece nos métodos descritos, o método da simulação permite determinar a capacidade útil de uma albufeira por meio de uma análise ao longo de uma série temporal. No entanto, tem a particularidade de referenciar as perdas de água a que a albufeira pode estar submetida. Ao contrário do que acontece nos métodos da curva de acumulação, torna-se útil na determinação do desempenho da albufeira, que permite que os responsáveis considerem restrições no abastecimento de água quando a albufeira se encontra vazia (Silva, 2010). A simulação é um método de tentativa-erro no qual uma suposição é feita sobre a capacidade, e as medidas de desempenho são finalmente avaliadas (McMahon e Adeloye, 2005).

A simulação é realizada ao longo de períodos de tempo consecutivos, cada um com uma duração constante, Δt . Recorrendo à equação da continuidade, é possível determinar a capacidade útil que permite cumprir as variáveis delimitadas. Esta equação é aplicada, estimando que no instante inicial, o volume armazenado, S_t , é igual a capacidade útil da albufeira, ou seja, assume-se que a albufeira se encontra cheia no instante zero – equação (2.23):

$$S_{t+1} = S_t + Q_t - D_t - E_t + P_t - L_t \quad (2.23)$$

Porém, a aplicabilidade da equação da continuidade está suscetível à seguinte restrição – equação (2.24):

$$0 \leq S_{t+1} \leq C \quad (2.24)$$

Onde S_t e S_{t+1} correspondem aos volumes de armazenamento no início dos períodos t e $t + 1$, respetivamente, com $t + 1 = t + \Delta t$. As restantes variáveis representam alterações no volume de armazenamento durante um certo período de tempo em que: Q_t é o volume afluente à albufeira, proveniente do escoamento no curso de água; P_t é o volume afluente proveniente da precipitação incidente na albufeira; D_t é o volume relativo à procura exigida; E_t representa o volume das perdas por evaporação e L_t , são outras perdas na albufeira (Silva, 2010). A Figura 10, retrata um esquema elucidativo que representa as variáveis em cima mencionadas.

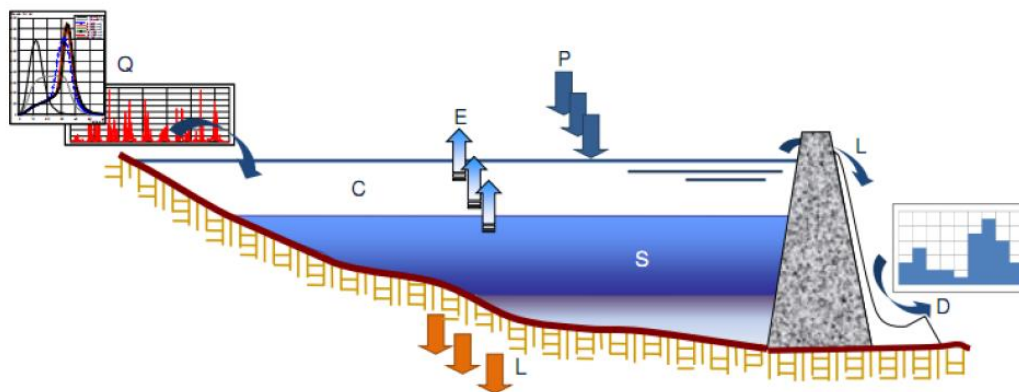


Figura 10 – Gráfico esquemático das variáveis intervenientes nas equações descritas. Adotada de (Silva, 2013)

O método da simulação é adequado ao desenvolvimento de uma análise comportamental do desempenho da albufeira. Se este método for aplicado sob as mesmas suposições que em qualquer outro método de acumulação descrito, ou seja, considerando nulas a evaporação e outras perdas, os resultados coincidirão com os fornecidos pelos métodos das curvas acumuladas.

3

CASO DE ESTUDO – BARRAGEM DE PRETAROUCA

3.1. ÁGUAS DO NORTE, S.A.

A empresa Águas do Norte, S.A. foi constituída pelo Decreto-Lei nº 93/2015, de 29 de maio, pela junção das empresas Águas do Douro e Paiva, S.A., Águas de Trás-os-Montes e Alto Douro, S.A., Simdouro – Saneamento do Grande Porto, S.A. e Águas do Noroeste, S.A., integradas no Grupo Águas de Portugal. Nessa decorrência, o Estado Português concedeu, em regime de concessão, a exploração e a gestão do sistema multimunicipal de abastecimento de água e de saneamento do Norte de Portugal àquela empresa, pelo prazo de trinta anos.

No seguimento do exposto, e num panorama atual, a AdN é uma das entidades gestoras dos sistemas multimunicipais em “alta”, responsável por atividades como a captação, tratamento e abastecimento de água destinado a consumo público e pela recolha, tratamento e rejeição de efluentes domésticos, urbanos e industriais e de efluentes provenientes de fossas sépticas [1].

No caso específico da região Noroeste do país, a AdN, assume o papel de explorar e gerir os sistemas de águas e saneamento, um resultado do acordo de uma parceria celebrada entre o Estado (Administração Central) e 8 Municípios (Administração Local) num processo de verticalização que agrupou, numa única entidade gestora, os serviços de abastecimento de água e de saneamento de águas residuais [1].

Salienta-se que a exploração e gestão realizada nos diferentes sistemas pertencentes à Águas do Norte, S.A., incluem o projeto, a construção, a extensão, a conservação, a reparação, a manutenção e a melhoria das obras e infraestruturas. Também a aquisição dos equipamentos e instalações necessárias ao desenvolvimento das atividades fazem parte das funções atribuídas [1]

3.2. CARACTERIZAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO BALSEMÃO

O Rio Balsemão é um rio português que nasce na Serra de Montemuro no lugar do Rossão (Figura 11) a uma altitude de aproximadamente 1352 metros, e tem uma extensão total de 32.4 quilómetros. No seu percurso, percorre várias freguesias e desagua no Rio Varosa, afluente do Rio Douro.

Dominando uma bacia hidrográfica de 24 km², o comprimento da linha de água principal no interior da bacia hidrográfica engloba uma extensão de 12680 metros e sua altitude varia entre 1352 e aproximadamente 900 metros. A sua precipitação anual apresenta um valor médio de 1990 mm e o escoamento superficial médio é, num ano médio, cerca de 1280 mm, ou seja, 30,749 hm³.



Figura 11 - Localização do Rio Balsemão (Website *Mapcarta*)

Toda esta região pertence à maior bacia hidrográfica da Península Ibérica, a bacia hidrográfica do Douro (Figura 12). O Rio Douro nasce na Serra de Urbion, a cerca de 1700 metros de altitude. Tem uma extensão de 927 quilómetros (terceiro maior rio da Península Ibérica) e desagua na cidade do Porto. Engloba uma área total de 97 478 km², dois quais 18 588 km² em Portugal (19,07%) e 78 889 km² em Espanha (80,93%).

A nível geológico, os leitos das linhas de água são geralmente constituídos por fundo rochoso, e ao longo de toda a sua extensão, o Vale do Douro revela um elevado índice de sinuosidade. Os biótopos aquáticos destacam-se pela sua importância na parte terminal e especialmente o troço intermédio da bacia do Rio Sabor, pois engloba uma área de interesse de diversidade aquática (Agência Portuguesa do Ambiente, 2014)

Na análise da “Carta dos Solos de Portugal Continental classificados pelas suas características hidrológicas”, foi permitido constatar a existência de diferentes tipos de solo na área da bacia hidrográfica de Pretarouca. Conclui-se que existem solos dos tipos B, C e D, aos quais correspondem potenciais de escoamento superficial variando entre abaixo da média e elevado. Significa então, que se tratam de solos com intensidades de infiltração moderadas a intensidades de infiltração muito baixas. (Lencastre e Branco, 2010)

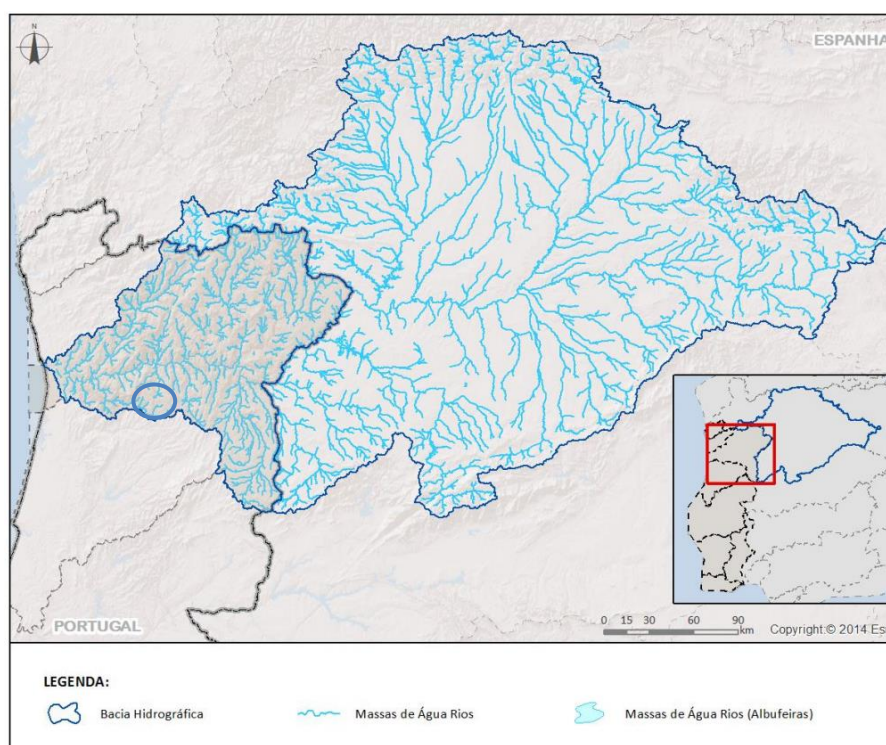


Figura 12 - Bacia Hidrográfica do Douro (Agência Portuguesa do Ambiente, 2016)

3.3.DESCRICÃO DA BARRAGEM DE PRETAROUCA

A barragem de Pretarouca (Figura 13) localiza-se no Rio Balsemão, cerca de 1 km a jusante da ponte que junta as povoações de Pretarouca e de Dornas, e a 1,5 km a montante da ponte da Estrada Nacional nº2. Trata-se de uma barragem de betão de gravidade clássica cuja construção foi iniciada em 2009. A barragem foi projetada com a finalidade única em assegurar o abastecimento urbano ao Sub-Sistema do Balsemão, que engloba os concelhos de Armamar, Tarouca, Lamego, Resende, Castro D'Aire, Vila Nova de Paiva e Cinfães.

A barragem possui uma altura máxima acima da fundação de 28,5 metros, sendo que a sua albufeira dispõe de 43,4 hectares de área inundada e 3 219 041 m³ de volume de armazenamento total, à cota do Nível de Pleno Armazenamento - NPA (919,50). O nível de máxima cheia (NMC) situa-se à cota 921,50 e o coroamento da barragem está fixado 1 metro acima, à cota 922,50. Ao longo deste coroamento, com cerca de 305,5 metros de comprimento, foi instalado um tabuleiro rodoviário com 7,5 metros de largura e com rasante horizontal à cota 923,40. O ponto mais baixo da fundação encontra-se à cota 894,0 e o Nível Mínimo de Exploração (NME) a 910,7 (CENOR, 2007).



Figura 13 - Barragem de Pretarouca (CENOR, 2013) [2]

3.3.1. CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA E GEOTÉCNICA LOCAL

A bacia hidrográfica que alimenta o rio Balsemão é constituída por um conjunto de várias linhas de água de 2ª ordem de importância relativamente idêntica. A rede de drenagem é considerada do tipo dentrítica, em que o seu desenvolvimento se assemelha à configuração de uma árvore, e é característica de regiões onde é dominante a presença de rochas intrusivas de grão grosseiro, maciças e resistentes à erosão.

Atendendo à constituição do maciço rochoso ao longo da zona de Pretarouca, formado fundamentalmente por granitos porfiróides de grão grosseiro muito compactos e resistentes, é importante admitir que a circulação de água infiltrada seja realizável praticamente através de fraturas e que em zonas onde existe decomposição rochosa, a circulação faz-se por porosidade.

A densidade da rede de drenagem superficial, é considerada elevada em toda a região, tendo origem em linhas de água, por vezes com vertentes muito inclinadas, retilíneas ou ligeiramente convexas. Os fundos dos vales das linhas de água revelam, de um modo geral, superfícies planas, ainda que preenchidas parcialmente por depósitos aluvionares, constituídos por calhaus e blocos rolados de várias dimensões.

Quanto à zona da albufeira, as margens desta, são geralmente suaves, embora persistam em zonas localizadas, alguns esporões rochosos mais resistentes e salientes. Os solos constituintes das encostas que englobam ambas as margens não apresentam, mesmo nas zonas de maior declive, quaisquer sinais de instabilidade.

Enquadrando geologicamente, trata-se de uma região de morfologia montanhosa, com relevos ásperos e vales geralmente estreitos, alguns deles com traçado retilíneo, que denunciam a existência de acidentes tectónicos. Salienta-se, dada a proximidade em relação à obra, a falha tectónica Penacova-Régua-Chaves, onde se encontra um trecho do rio Balsemão. O local da barragem situa-se a cerca de 1,5 km desta falha, que corresponde a uma das linhas estruturais de maior importância na zona Norte do país. Pode-se por isso, realçar que a morfologia atual desta região deriva essencialmente de causas tectónicas e dos efeitos da erosão intensa e prolongada.

Em termos de sismos tectónicos, considera-se que o local onde está inserida a barragem de Pretarouca, pode ser afetado por dois tipos de ações sísmicas: sismos de magnitude moderada a pequena distância focal (sismos em terra) e sismos de maior magnitude a uma maior distância focal (sismos no mar) (DL n°235/83).

3.3.2. ÓRGÃOS HIDRÁULICOS INCORPORADOS NA BARRAGEM

3.3.2.1. Descarregador de Cheias

Os descarregadores de cheias funcionam como órgãos de segurança das barragens. Têm como objetivo o livre escoamento da cheia de projeto em condições de segurança, em qualquer situação, sem recorrer a outros quaisquer dispositivos de descarga.

O descarregador de cheias da barragem de Pretarouca (Figura 14) é constituído por uma soleira descarregadora do tipo Creager, em betão armado, com crista à cota 919,50 (NPA). Apresenta dois vãos de 15,5 metros, separados por um pilar de suporte do viaduto em betão armado. O pilar apresenta um perfil hidrodinâmico, com uma secção transversal constituída por um semicírculo com 1,5 metros, a montante, e por retângulo ($3,75 \times 1,50$) metros a jusante (CENOR, 2007).

O canal de descarga, dotado de degraus que apresentam um aumento progressivo da sua dimensão no sentido descendente, fica situado sobre o paramento de jusante da barragem, e tem largura constante ao longo do desenvolvimento, intersectando o topo da laje de soleira da bacia de dissipação de energia à cota 897,0. O descarregador é delimitado, lateralmente, por muros em betão armado, com 1,5 metros de espessura por 1,70 metros de largura (CENOR, 2007).



Figura 14 - Descarregador de cheias da barragem de Pretarouca (Águas do Norte S.A. 2013).

A jusante do canal de descarga, o descarregador de cheias é provido de duas bacias de dissipação (principal e auxiliar). A bacia auxiliar localiza-se a jusante da principal (Figura 15), e provém de menor comprimento em relação à primeira.

A principal bacia de dissipação de energia, é definida por bacia do tipo III do USWB, munida de blocos de queda e de blocos de impacto. Dispõe de 32,5 metros de largura bem como o canal de descarga em degraus que a ela conduz, e 12,7 metros de comprimento (CENOR, 2007).

A extremidade de jusante da bacia principal de dissipação é materializada por um açude contra-embalse de betão, ao qual a 2,2 metros abaixo, está limitado o fundo da bacia. O coroamento dos muros laterais da bacia foi definido em conformidade com as alturas conjugadas do ressalto hidráulico; as oscilações; e a agitação expectável do escoamento sob superfície livre.

Quanto à bacia de dissipação de energia auxiliar, localizada 0,5 metros abaixo da principal, foi dimensionada com o intuito de conter o ressalto hidráulico até um caudal máximo de $5 \text{ m}^3/\text{s}$, sem blocos de queda, nem de impacto. Identicamente à bacia principal, possui 32,5 metros de largura, mas 2,75 metros de comprimento. O seu fundo situa-se apenas 0,5 metros sob a superfície geral do leito do rio (CENOR, 2007).



Figura 15 - Bacias de dissipação de energia (principal e auxiliar) (Águas do Norte S.A. 2013)

3.3.2.2.Descarga de fundo

O esvaziamento da albufeira (Art.15º - Regulamento de Segurança das Barragens) e o controlo da subida de nível na albufeira durante o primeiro enchimento são os principais objetivos da utilização das descargas de fundo. A descarga de fundo da Barragem de Pretarouca fica localizada num dos blocos centrais da barragem (Figura 16). A sua zona de entrada é munida de uma grelha formada por barras verticais, em betão armado. As barras, com 3,5 metros de altura, são caracterizadas por exibirem uma secção transversal constituída por um semicírculo com 0,075 metros de raio e um retângulo de (0,225 × 0,15) metros. Intersectando as barras verticais, formando a grelha, existem varões horizontais em aço, que permitem impedir a penetração de detritos grosseiros que possam obstruir o circuito interno (CENOR, 2007).



Figura 16 - Descarga de fundo da barragem de Pretarouca (Águas do Norte S.A. 2009)

A zona de entrada da descarga de fundo corresponde a um troço de secção quadrada, onde são intercaladas duas comportas planas de corrediça, ambas comandadas por servomotores hidráulicos, instalados superiormente na câmara de válvulas. Excetuando a grelha cilíndrica de barras verticais, constituída por betão à vista, todo o circuito hidráulico da descarga de fundo é revestido por blindagem metálica que evita o desgaste se a velocidade da água atingir valores elevados.

3.3.2.3. Tomada de água e circuitos para abastecimento urbano e caudal ecológico

A tomada de água para abastecimento urbano e a descarga de caudal ecológico localizam-se, quase totalmente, no interior do corpo da barragem e têm circuitos parcialmente comuns. O troço inicial é comum, constituído por três tomadas de água a diferentes níveis (Figura 17), de forma a assegurar a qualidade da água captada, implantadas no paramento de montante da barragem, com passagem e vazão controlada mediante comportas operadas a partir de uma câmara superior, em betão armado, instalada imediatamente sob o tabuleiro rodoviário.



Figura 17 - Tomadas de água nos diferentes níveis no corpo da barragem de Pretarouca (Águas do Norte S.A. 2009)

Após a zona de tomada de água, a adução para abastecimento urbano e a descarga de caudal ecológico partilham ainda o mesmo circuito hidráulico comportada por uma conduta de 800 milímetros embebida no corpo da barragem, que bifurca, posteriormente, em duas outras com a mesma dimensão. Para jusante, ainda no interior da barragem, o circuito correspondente à descarga de caudal ecológico é bifurcado a partir da câmara de válvulas em dois circuitos paralelos. A tubagem para adução do abastecimento urbano, é desenvolvida num circuito embebido, até uma câmara de válvulas enterrada, situada no exterior da barragem (CENOR, 2007).

3.3.2.4. Galeria de injeção e drenagem

Situada no interior do corpo da barragem, a galeria de injeção e drenagem percorre quase toda totalidade do perímetro da fundação. É provida de duas entradas no paramento de jusante, uma a partir da margem direita e outra da esquerda.

Através de dois poços de bombagem, onde estão instaladas duas bombas submersíveis por poço, uma de serviço e outra de reserva, as águas captadas na galeria de drenagem são bombadas de volta para a albufeira, contrariamente ao que é habitual na maioria das barragens, em que a água recolhida no sistema de drenagem é remetida para jusante do mesmo.

3.3.3. SISTEMA BY-PASS

O sistema de “By-Pass” realizado, destina-se permitir a passagem da fauna aquática, com especial realce para a toupeira-de-água, e estabelece a ligação entre a extremidade de montante da albufeira e o pé de jusante da barragem. Este sistema foi elaborado de modo a satisfazer a Cláusula 44 da DIA (Declaração de Impacte Ambiental), que refere a importância de assegurar a ligação entre as zonas não afetadas pelo

projeto, a montante e a jusante da barragem, através da corporização de um sistema artificial alternativo ao leito do rio Balsemão afetado.

De montante para jusante, este sistema abrange primeiramente um açude de derivação, um canal de “By-Pass” e uma escada destinada exclusivamente à ictiofauna.

O açude de derivação (Figura 18), localiza-se na extremidade de montante da albufeira e tem como função, o desvio do leito natural do rio, de forma a criar condições de funcionamento ao transporte de água pelo canal. Trata-se de um açude móvel, de betão gravidade, equipado com uma comporta de charneira do tipo Obermeyer com 24,0 metros de vão e 3,0 metros de altura. Esta é constituída por uma folha metálica apoiada sobre almofadas de borracha insufláveis, que se destinam a servir como órgão de suporte e de regulação da abertura (CENOR, 2007).



Figura 18 - Açude a montante da albufeira de Pretarouca a descarregar (Águas do Norte S.A. 2013)

O canal de “By-Pass” (Figura 19), com uma extensão de cerca de 2300 metros e baixo declive, tem como ponto de partida, a tomada de água para o caudal que está colocada no encontro direito do açude e desenvolve-se ao longo da margem direita da albufeira até atingir o encontro direito da barragem. A tomada de água é regulada mediante uma abertura com 1,35 metros de comprimento e 1 metro de largura, protegida por uma grelha de três barras verticais, de modo a evitar a entrada de detritos flutuantes de grande dimensão. O canal é constituído por betão, tal permitindo a garantir a sua estabilidade e estanquidade, sendo a espalda direita revestida com colchões Reno, preenchidos com enrocamento de pequena dimensão por forma a fazer que a toupeira-de-água possa repousar, alimentar-se e sair ou entrar do canal conforme a sua necessidade. Na sua extremidade a jusante, o canal de “By-Pass” atravessa o encontro direito da barragem, transpondo-se para a escada de fauna aquática (CENOR, 2007).



Figura 19 - Canal "By-Pass" da barragem de Pretarouca (Águas do Norte S.A. 2013)

A escada para transposição de peixes/fauna aquática (Figuras 20), tem uma extensão de 270 metros de comprimento total e um declive de 10%. Com uma queda total de 25,75 metros ao longo de 103 escalões de 0,25 metros cada, apresenta 102 bacias sucessivas, separadas entre si por septos, equipados com descarregador de superfície e com um orifício afogado. Esta escada foi adaptada com o intuito de tornar eficiente e vantajoso à utilização da toupeira-de-água, com adaptações relacionadas com o desenvolvimento alimentar e descanso. Na última bacia, o caudal da escada de peixes é reunido com o caudal proveniente da descarga de caudal ecológico, sendo o caudal total lançado no rio a jusante da barragem, por intermédio de um único descarregador de superfície (CENOR, 2007).



Figura 20 – Escada de peixes da barragem de Pretarouca (Águas do Norte S.A. 2013)

3.3.4. CURVAS DE ÁREAS INUNDADAS E VOLUMES ARMAZENADOS

As curvas de áreas inundadas e de volumes armazenados na albufeira de Pretarouca, foram definidas com base em plantas topográficas, devidamente auxiliadas de curvas de nível de metro a metro, e levantadas especificamente para o projeto. A Figura 21 representa uma planta topográfica da zona envolvente à albufeira de Pretarouca.

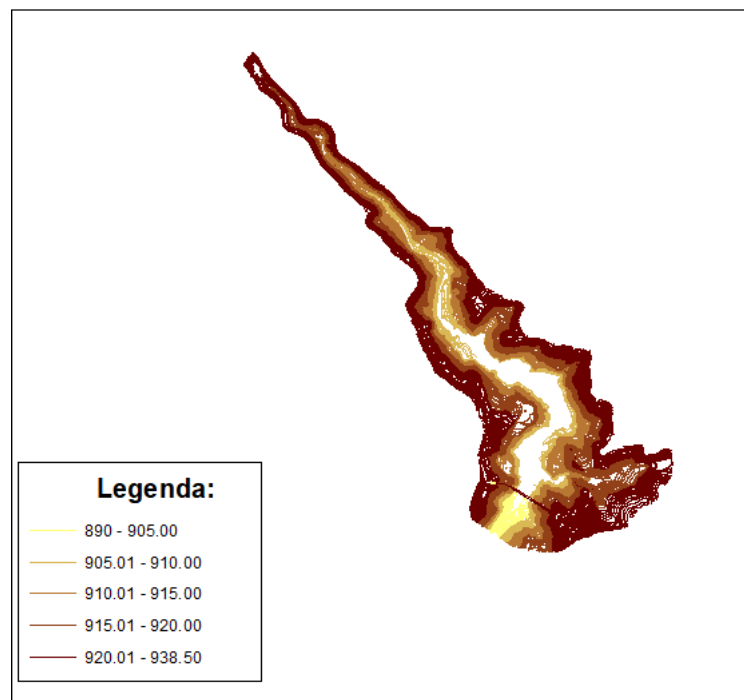


Figura 21 - Planta topográfica da albufeira de Pretarouca (CENOR, 2007)

São seguidamente apresentadas as correspondentes áreas inundadas (m^2) (Figura 22) de volumes armazenados (m^3) (Figura 13), que traduzem os respetivos valores indicados na tabela 4, em que a cota mais baixa corresponde ao pé da barragem.

Tabela 4 - Áreas inundadas e volumes armazenados na albufeira de Pretarouca (CENOR, 2007).

Cota do Plano de Água	Área inundada (m ²)	Volume armazenado (m ³)
898,5	0	0
899	439	73
900	1 520	998
901	3 949	3 638
902	9 503	10 164
903	17 530	23 478
904	31 021	47 435
905	43 983	84 749
906	63 889	138 376
907	84 280	212 226
908	107 644	307 950
909	123 534	423 448
910	148 970	559 502
911	171 279	719 496
912	197 766	903 860
913	224 427	1 114 816
914	250 126	1 351 977
915	282 750	1 618 248
916	309 124	1 914 087
917	346 388	2 241 667
918	378 518	2 604 001
919	415 843	3 001 035
920	456 468	3 437 033
921	495 357	3 912 814
922	538 175	4 429 432
923	576 041	4 986 432
924	619 390	5 584 016

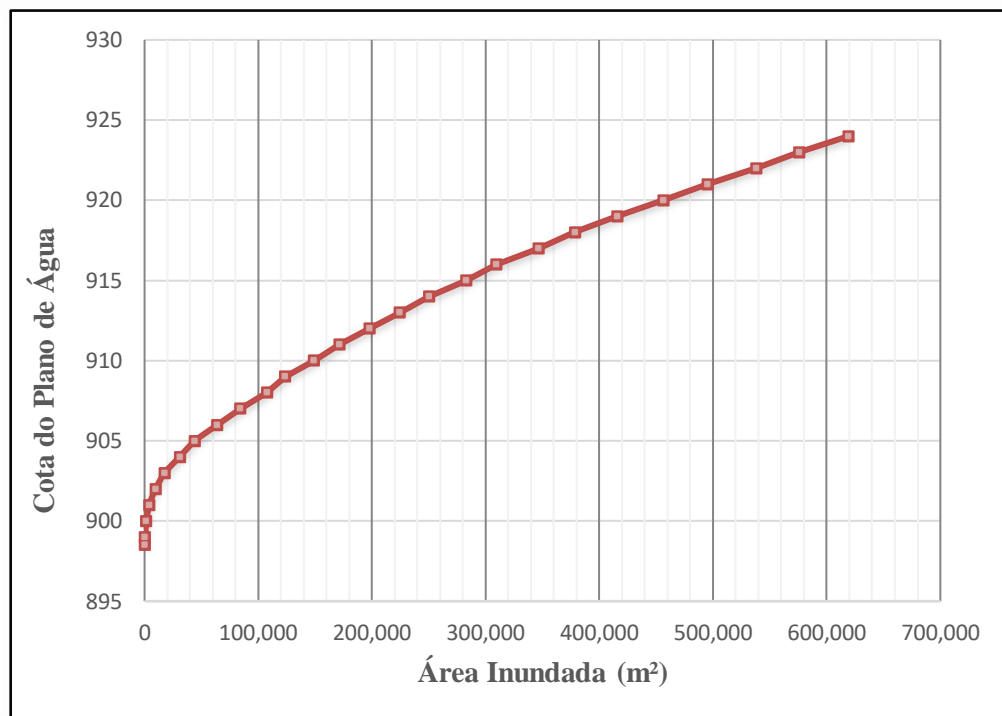


Figura 22 - Curva de área inundada na albufeira de Pretarouca

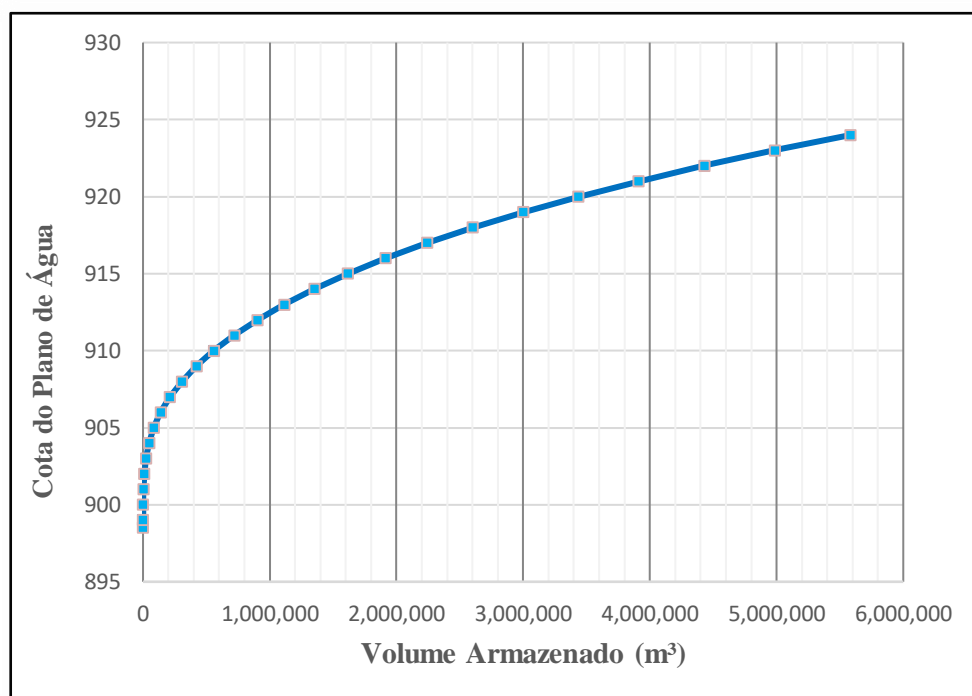


Figura 23 - Curva do Volume armazenado na albufeira de Pretarouca

4

METODOLOGIA APLICADA

4.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo é apresentada a metodologia a adotar neste estudo e correspondentes resultados da sua aplicação. O trabalho fundamenta-se numa breve análise do tratamento de dados essenciais ao dimensionamento da albufeira e aos existentes desde que esta se encontra em exploração.

O trabalho desenvolvido é resumido nos seguintes pontos:

1. Análise e validação do estudo hidrológico previsto no projeto;
2. Estudo do desempenho da albufeira nos anos em exploração;

A primeira tarefa do trabalho, diz respeito ao estudo hidrológico previamente concretizado antes do início da exploração da albufeira de Pretarouca. Consiste na análise desenvolvida e na abordagem selecionada para o estudo hidrológico da barragem de Pretarouca. O seu desenvolvimento serve-se da relação precipitação-escoamento de forma a atingir os potenciais volumes afluentes à bacia do rio Balsemão. Compreende inicialmente a seleção e caracterização dos postos pluviométricos, estações hidrométricas e estações climatológicas. Para a realização do estudo hidrológico, foi necessário consultar os dados disponíveis na plataforma do Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos relativos às estações a referenciar. Posteriormente, com base nos dados existentes, procurou-se obter uma previsão mais ou menos rigorosa das afluições mensais com base em dados passados, cujos procedimentos serão explicados em detalhe no subcapítulo 4.3.

Seguidamente, foi realizada uma análise do desempenho da albufeira desde o ano em que esta iniciou a exploração – no ano hidrológico 2010/11 – até ao presente ano hidrológico de 2017/18. Partindo dos níveis da albufeira, com uma resolução horária, são explicados detalhadamente os procedimentos de cálculo dos volumes descarregados, extraídos e evaporados e, finalmente, após a análise do estudo da albufeira, constata-se os volumes resultantes das afluições finais.

Por fim, tendo em conta as previsões dos volumes afluentes na bacia e os volumes afluentes verificados desde que esta se encontra em observação, o objetivo é proceder a uma análise comparativa para que seja admissível verificar as convergências e adotar potenciais medidas satisfatórias de exploração.

Nas secções seguintes deste capítulo são descritos os dados de base e os métodos adotados realizados e a realizar para cada uma das metodologias consideradas.

4.2. ANÁLISE E VALIDAÇÃO DO ESTUDO HIDROLÓGICO PREVISTO

4.2.1. AVALIAÇÃO DA PRECIPITAÇÃO PONDERADA NA BACIA DO BALSEMÃO

As estações meteorológicas ou postos pluviométricos apresentam, frequentemente, pequenas quebras nos seus registos por ausência do observador ou falhas na instrumentação. É essencial e necessário estimar os valores não registados (Carrigan, 1984).

Primeiramente foram identificados todos os postos inseridos na zona envolvente à bacia hidrográfica dominada pela albufeira de Pretarouca, e recolhidos os correspondentes registos. Numa fase inicial optou-se por limitar a recolha de registos de uma série histórica apenas aos postos com 30 ou mais anos de observação com períodos completos.

Traçada a delineação da bacia hidrográfica dominada pela barragem de Pretarouca, e localizados os postos pluviométricos nas condições referidas, obtida a área de influência dos mesmos na bacia através do método de Thiessen, foram então considerados e analisados os registos pluviométricos das três estações meteorológicas que com influenciavam na bacia hidrográfica em estudo: Gralheira, Mezio e Picão. Recolheram-se registos anuais da precipitação das mesmas, tendo em consideração que todas as estações se inseriam na zona e imediações da bacia hidrográfica em estudo, como se pode verificar na Figura 24:

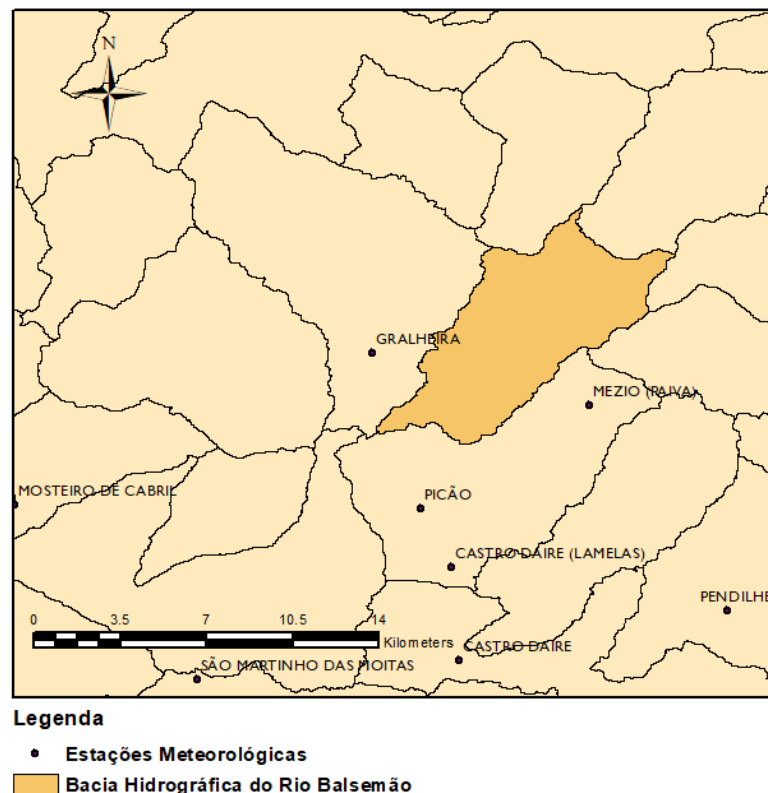


Figura 24 – Identificação das estações meteorológicas na bacia hidrográfica em estudo

Na tabela 5 apresentam-se algumas das características das estações, designadamente a sua identificação (nome e código da estação), altitude, período de registos completos e incompletos e estado de funcionamento.

Tabela 5 – Postos pluviométricos

Identificação	Altitude (m)	Período de Registos		Estado de Funcionamento
		Completo	Incompleto	
Gralheira	1104	1946/47 - 1994/95	1995/96 - 2010/11	Ativa
Mezio (Paiva)	925	1946/47 - 2007/08	2008/09 - 2010/11	Ativa
Picão	920	1944/45 - 1984/85	1985/86 - 2010/11	Extinta

Após a análise dos registos disponíveis, verificaram-se que existiam numerosas falhas, respeitantes a diferentes períodos de observação. Face às diversas falhas existentes, o estudo de precipitações acabou por ficar limitado ao período de 30 anos compreendido entre 1963/64 e 1994/95, sem considerar os anos 1973/74 e 1974/75 devido à inconsistência dos registos. De modo a completar a integridade das séries anuais de precipitação da Estação de Picão, optou-se pelo procedimento de preenchê-las e prolongar a séries histórica.

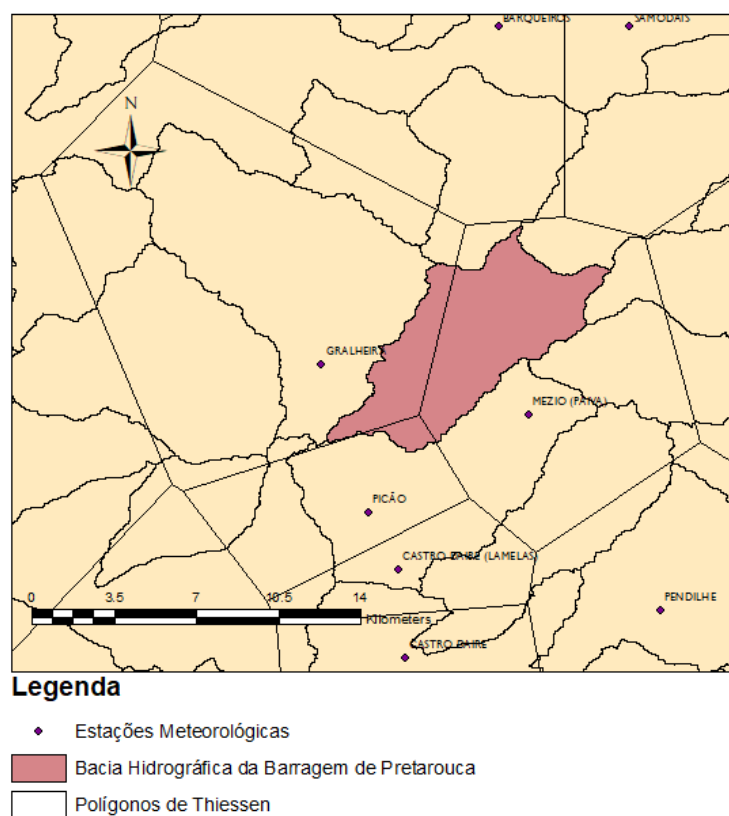


Figura 25 - Aplicação do método de Thiessen

De acordo com o método de Thiessen, o cálculo do valor ponderado da precipitação sobre uma bacia hidrográfica pode ser efetuado utilizando a seguinte equação (Maia, 2008):

$$P = \sum_{i=1}^n \left(P_i * \frac{S_i}{S} \right) \quad (4.1)$$

em que:

- P – Precipitação média na área em estudo (mm);
- P_i – Precipitação média na área do polígono (mm);
- S_i – Área de Influência (km^2);
- S – Área total (km^2) resultante da soma das áreas de influência (S_i) em Km^2

O coeficiente de Thiessen é dado pelo valor decorrente do quociente entre a área de influência e a área total da região que compreende os polígonos de Thiessen (S_i/S). Na tabela 6, esquematiza-se a informação relativa aos coeficientes de influência dos postos pluviométricos, avaliados de acordo com o método de Thiessen.

Tabela 6 – Áreas de influência

Identificação	Coeficiente de Thiessen (S_i/S)
Gralheira	0,465
Mezio (Paiva)	0,486
Picão	0,049

Como referido, de forma a completar os registos ausentes na estação de Picão, foi utilizado o método das duplas acumulações, o que permitiu o preenchimento das lacunas nos registos incompletos do posto entre os anos hidrológicos 1985/86 a 1994/95. Os valores calculados apresentam-se na Tabela 7, indicados a sombreado. Foram determinados com base nos registos de precipitação de Mezio, uma vez que de todas estações meteorológicas abordadas, este é o posto modelo que apresenta melhor coeficiente de correlação (R^2).

Com base nas precipitações nos 3 postos, e atentos os coeficientes de Thiessen correspondentes, foram obtidas as precipitações anuais ponderadas sobre a bacia para o período de 30 anos (Tabela 7) (entre 1963/64 e 1994/95, excetuando os anos 1973/74 e 1974/75)

Tabela 7 - Séries de precipitações anuais nos postos pluviométricos e precipitações anuais ponderadas na bacia hidrográfica da barragem de Pretarouca para um período de 30 anos.

Ano Hidrológico	Precipitações nos Postos Pluviométricos (mm)			Precipitações ponderadas sobre a bacia de Pretarouca (mm)
	07J/05	08J/02	08J/03	
	Gralheira	Mezio	Picão	
1963/64	3145	2587,5	2696,9	2852,1
1964/65	1589	1330,9	1740	1471,0
1965/66	3649,2	3239,7	2844,4	3410,7
1966/67	1957,1	1892,2	1515,5	1903,9
1967/68	2012,4	1691,5	1503,7	1831,5
1968/69	3146	2698,8	2357,8	2890,0
1969/70	1690,3	1852,6	1647,5	1767,1
1970/71	2139,1	1834,3	1847,2	1976,7
1971/72	1884,9	1618,1	1548,3	1738,7
1972/73	2088,3	1995,2	1742,8	2026,1
1975/76	1309,4	1210,6	1208,9	1256,5
1976/77	3295,3	3473	2680,8	3351,6
1977/78	2974,8	2681,7	2468,1	2807,5
1978/79	3442,7	3507,3	2774,2	3441,3
1979/80	2000,1	1810,6	1858,6	1901,1
1980/81	1617,6	1397,5	1308,8	1495,5
1981/82	2033,4	1759,7	1875,2	1892,6
1982/83	2402,5	1866,2	1759	2110,3
1983/84	2369,6	1734,6	1765,1	2031,4
1984/85	2684,2	2407,9	2319,9	2532,1
1985/86	2273,6	1915,5	1862	2079,4
1986/87	1683,4	1413,9	1470,4	1542,0
1987/88	2801,4	2039,2	1958,6	2389,7
1988/89	1347,3	1003,7	1150,2	1170,7
1989/90	1593	1621,4	1632,4	1608,7
1990/91	2014,7	1470,1	1514,2	1725,5
1991/92	1479,6	1199,6	1303,1	1334,9
1992/93	2012	1469,9	1514,2	1724,1
1993/94	2648,9	1992,8	1922,4	2294,4
1994/95	1996,6	1497,3	1535,5	1731,3
Média (30 anos entre 1963/64 e 1994/95, sem os anos hidrológicos 1973/74 e 1974/75)	2242,7	1940,8	1844,2	2076,5

Analisando a aplicação desta metodologia de avaliação da precipitação ponderada na bacia de Pretarouca, conclui-se que a precipitação média anual ponderada na bacia hidrográfica de Pretarouca, obtida pelo método dos polígonos de Thiessen para o período histórico em análise foi de 2077 mm. Da análise dos valores da Tabela 7, pode, desde logo afirmar-se que, decorrente da observação desta série histórica: o ano hidrológico de 1985/86 se apresenta como o ano com características pluviométricas mais próximas da média; o ano hidrológico 1988/89 apresenta os valores de precipitação mais reduzidos enquanto o ano hidrológico de 1978/79 exibe os valores de precipitação mais elevados.

4.2.2. AVALIAÇÃO DOS ESCOAMENTOS SUPERFICIAIS NA BACIA HIDROGRÁFICA

A determinação dos escoamentos superficiais na bacia hidrográfica de Pretarouca foi realizada com base na série de escoamentos mensais da estação Hidrométrica de Cabriz, que monitoriza as componentes hidrológicas da bacia do rio Cabriz. A precipitação em ano médio na bacia de Cabriz, é da mesma ordem de grandeza da precipitação verificada sobre a bacia de Pretarouca. Para além de corresponder à estação hidrométrica mais próxima da bacia de Pretarouca, a bacia de Cabriz, revelou possuir características climáticas semelhantes, cujos dados se encontram disponibilizados pelo SNIRH.

A partir dos valores de escoamento superficial e das precipitações verificadas na bacia de Cabriz pela E.H. Cabriz para um período de 22 anos, estabeleceu-se uma equação de correlação entre a precipitação e o escoamento anuais (Figura 26). O objetivo passaria por determinar um método por analogia, que pudesse ser aplicado com credibilidade à bacia de Pretarouca.

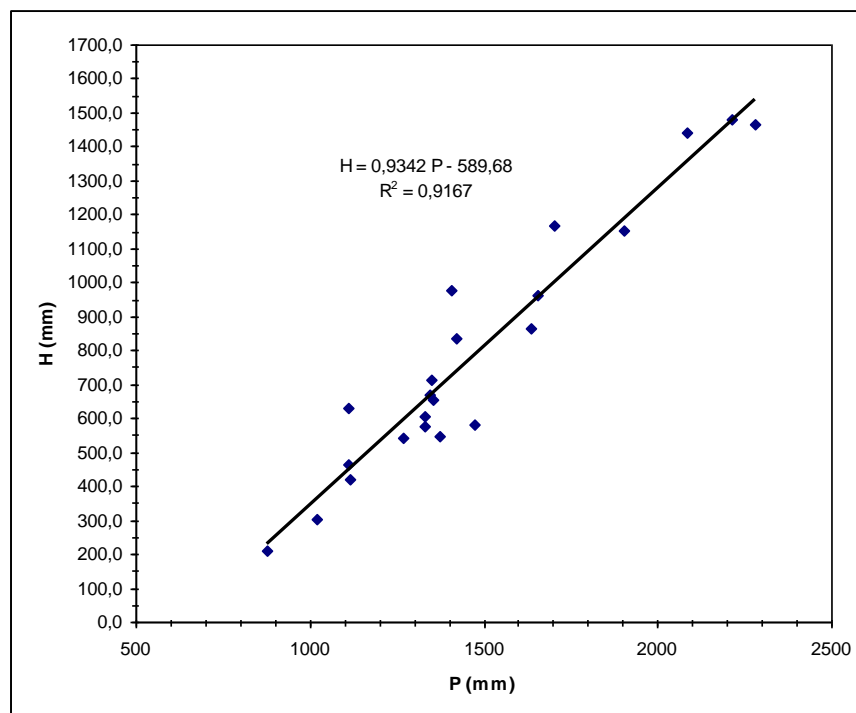


Figura 26 - Correlação entre a precipitação P(mm) e o escoamento anual H(mm) na Estação Hidrométrica de Cabriz

Inicialmente, o valor obtido para coeficiente de correlação é considerado razoável (0,92). Nesse sentido, decidiu-se em projeto analisar outros métodos obtidos por vários autores (Gonçalves Henriques, A.C.

Quintela e Turc), para a mesma área geográfica. Recorreu-se à calibração da fórmula de Turc para estimar o valor correspondente escoamento anual médio, dado pela equação (4.2)

$$H = P - \sqrt{\frac{P^2}{0,9 + \frac{P^2}{L^2}}} \quad (4.2)$$

Em que, P (mm) é a precipitação anual média, H (mm) é escoamento anual médio e L (mm) corresponde ao poder evaporante da atmosfera.

Como critério para avaliação na determinação do poder evaporante, L , impôs-se que o correspondente valor de H obtido pela fórmula de Turc deve ser da mesma ordem de grandeza que o determinado pela reta de correlação da E.H. de Cabriz. Assim, a fórmula de Turc é calibrada com base nos valores de precipitação e escoamento respeitantes a um ano médio anual obtido da reta de regressão da E.H. de Cabriz. Obtém-se um valor de poder evaporante da atmosfera de $L = 765,2$ mm. Posto isto, a Tabela 8, representa a série de escoamentos anuais afluentes à albufeira da barragem de Pretarouca, para o período de 30 anos, entre 1963/64 e 1994/95, excetuando os anos de 1973/74 e 1974/75.

Tabela 8 - Séries de precipitações, défices de escoamento e escoamentos anuais afluentes à albufeira de barragem de Pretarouca (CENOR, 2007)

Ano hidrológico	Precipitação anual (mm)	Escoamento anual	
		(mm)	(x1000 m ³)
1963/64	2852,1	2110,5	47881
1964/65	1471,0	784,8	17517,9
1965/66	3410,7	2662,3	60563,3
1966/67	1903,9	1188,9	26744,7
1967/68	1831,5	1120,2	25178,4
1968/69	2890,0	2147,9	48741,5
1969/70	1767,1	1059,3	23779,7
1970/71	1976,7	1258,4	28328,6
1971/72	1738,7	1032,6	23171
1972/73	2026,1	1305,8	29419,5
1975/76	1256,5	593,9	13371,4
1976/77	3351,6	2603,7	59108,4
1977/78	2807,5	2066,7	46876,2
1978/79	3441,3	2692,6	61259
1979/80	1901,1	1186,2	26683,3
1980/81	1495,5	807,1	18026
1981/82	1892,6	1178,2	26499,7
1982/83	2110,3	1386,7	31275,2
1983/84	2031,4	1310,8	29535,8
1984/85	2532,1	1796,5	40672,6
1985/86	2079,4	1357,0	30592,6
1986/87	1542,0	849,7	18995,9

Ano hidrológico	Precipitação anual (mm)	Escoamento anual	
		(mm)	(x1000 m³)
1987/88	2389,7	1657,5	37483,8
1988/89	1170,7	520,3	11514,7
1989/90	1608,7	911,3	20400
1990/91	1725,5	1020,2	22887,5
1991/92	1334,9	662,6	14740,2
1992/93	1724,1	1018,9	22858,3
1993/94	2294,4	1564,9	35359
1994/95	1731,3	1025,7	23012,8
Médias	2076,28	1280,2	30 749,3

Com o intuito de desagregar os valores anuais obtidos em escoamentos mensais, determinou-se através da distribuição percentual típica de um ano de características médias com base nos 22 anos de registos mensais da E.H. de Cabriz (Tabela 9).

Tabela 9 - Distribuição mensal das afluências num ano de características médias em Pretarouca.

Mês	Percentagem (%)	Afluências médias em Pretarouca (m³)
outubro	1,86	570 944
novembro	5,49	1 686 642
dezembro	14,2	4 365 366
janeiro	18,2	5 595 253
fevereiro	26,18	8 049 789
março	11,22	3 448 712
abril	9,48	2 916 529
maio	7,82	2 404 251
junho	3,39	1 043 414
julho	1,09	336 281
agosto	0,62	189 616
setembro	0,46	142 474
TOTAL	100	30 749 272

Esta distribuição, aplicada aos 30 anos de escoamentos anuais anteriormente representados, permite obter a série de escoamentos mensais que se apresenta no Anexo A. Através das séries de afluências previstas em projeto, torna-se essencial perceber se numa fase posterior, a albufeira seguiu o desempenho que estaria previsto.

4.3. ESTUDO DO DESEMPENHO DA ALBUFEIRA DE PRETAROUCA

Neste subcapítulo, é descrita a metodologia utilizada para a caracterização do desempenho da albufeira desde que a mesma se encontra sob exploração. Os dados reais observados/registados do caso de estudo correspondem às condições de operação da Barragem de Pretarouca, desde o ano hidrológico de 2011/12 a 2017/18. Alguns dos correspondentes dados de base, disponibilizados pela empresa Águas do Norte, S.A, estão sintetizados ao longo desta secção. São analisados volumes descarregados, quer pelo descarregador de cheias como pelo descarregador de fundo, volumes captados, volumes contabilizados pela descarga de caudal ecológico e sistema de By-Pass, volumes infiltrados e, por último, volumes evaporados.

4.3.1. DESCARREGADOR DE CHEIAS

O descarregador de cheias, implantado sobre o corpo da barragem, foi dimensionado para uma cheia com 1000 anos de período de retorno. Constituído por uma soleira descarregadora livre, do tipo Creager, com crista à cota 919,5, trata-se de um perfil com paramento de montante vertical.

O caudal descarregado por esta soleira é dado pela equação (4.3):

$$Q = C\sqrt{2g}bH^{1,5} \quad (4.3)$$

Em que, Q , corresponde ao caudal descarregado em m^3/s ; b , o comprimento útil da crista da soleira descarregadora; $H = N - 919.50$, representa a carga hidráulica em metros sobre a crista da soleira descarregadora; N , é a cota do plano de água na albufeira; e C , o coeficiente de vazão.

Na Figura 27, é demonstrado um gráfico relativo ao coeficiente de vazão de uma soleira descarregadora Creager em função de H/H_0 .

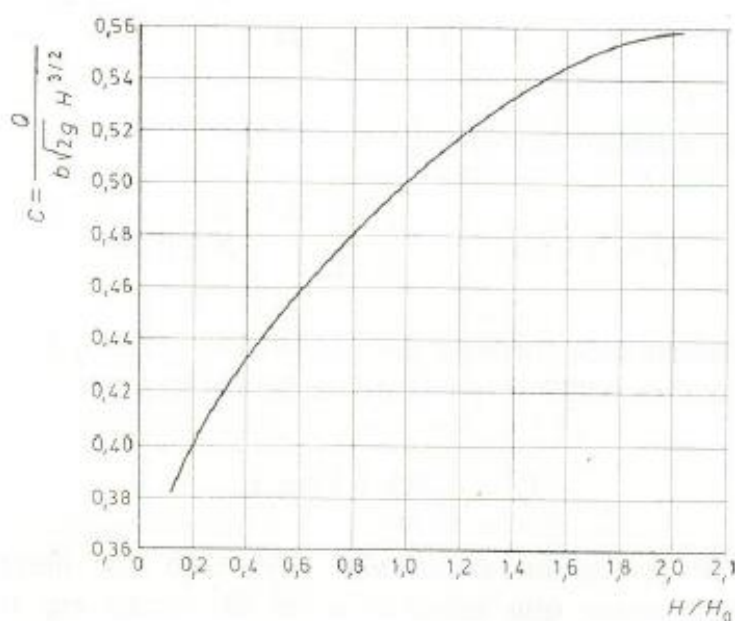


Figura 27 - Coeficiente de vazão de uma soleira descarregadora Creager em função de H/H_0 (CENOR, 2007)

Para H_0 , que corresponde à carga com a qual será descarregada a ponta de cheia efluente milenar (Figura 28), foi considerada em projeto o valor de 2,0 metros, baseado no amortecimento da cheia milenar no descarregador.

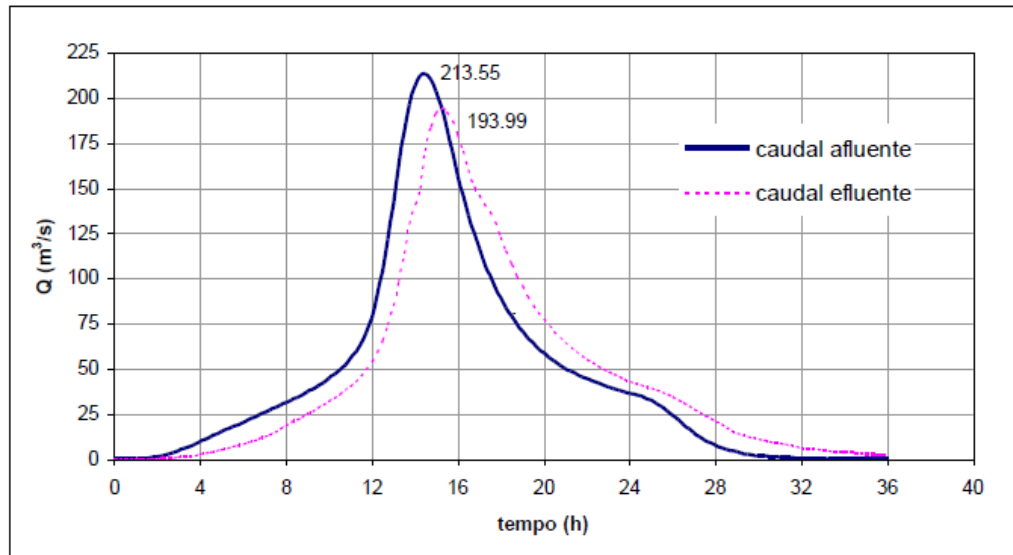


Figura 28 – Amortecimento de cheia milenar no descarregador de cheias da barragem

O correspondente hidrograma efluente tem um caudal de ponta de 193,99 m³/s, que corresponde a uma carga hidráulica máxima de $H \approx 2$ m sobre a crista descarregadora.

Posto isto, o nível máximo de cheia (NMC) considerado em projeto foi de 921,5, que corresponde à soma do nível de pleno armazenamento (NPA) com a carga hidráulica máxima, $NMC = NPA + H = 919,5 + 2$.

A empresa Águas do Norte S.A. monitoriza em contínuo os níveis da albufeira dispondo de registos horários, desde 01/10/2011. A partir dos níveis puderam ser obtidos os correspondentes caudais descarregados pelo descarregador de cheias. Verifica-se na Figura 29, um esquema sintetizado da aplicação do processo de cálculo dos caudais referidos.

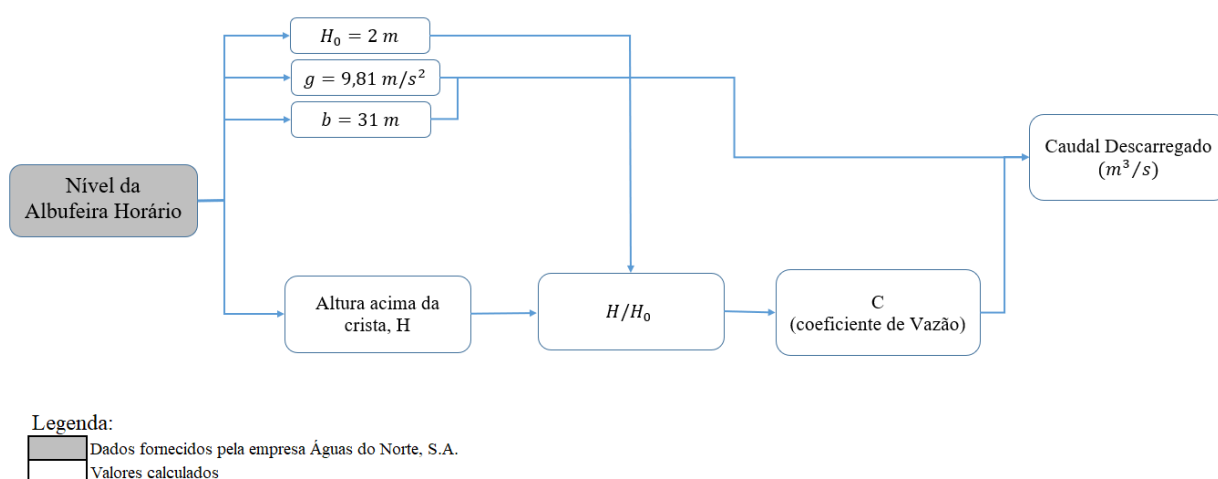


Figura 29 - Esquema de cálculo dos caudais descarregados pelo descarregador de cheias

Na Tabela 10, numeram-se os volumes totais mensalmente descarregados através do descarregador de cheias da barragem, determinados com base nos registos horários dos níveis da água da albufeira de Pretarouca, desde 1/10/2011 até 01/06/2018.

Tabela 10 - Volumes descarregados mensalmente pelo descarregador de cheias, desde 2011/12

Meses	Volume descarregado pelo descarregador de cheias (m³)							Total Período
	2011/12	2012/13	2013/14	2014/15	2015/16	2016/17	2017/18	
out	0	0	944 001	3 870 425	1 345 483	0	0	6 159 909
nov	2 064 093	1 781 660	1 613 437	8 610 843	1 767 872	0	0	15 837 905
dez	2 981 497	6 077 962	5 924 882	2 821 465	1 146 605	0	0	18 952 411
jan	147 614	9 231 041	12 318 918	3 893 562	12 210 798	400 070	1 252 619	39 454 622
fev	338 359	4 122 816	15 572 737	3 658 938	7 799 213	3 154 330	562 593	35 208 986
mar	166 770	9 793 474	3 983 210	1 099 715	2 430 798	399 966	11 349 612	29 223 545
abr	1 904 723	4 367 579	3 102 521	279 338	6 367 177	10 645	5 301 966	21 333 949
mai	2 956 875	435 944	548 819	1 126 293	2 241 820	182 761	81 435	7 573 947
jun	16 442	544	106 883	0	52 403	0		176 272
jul	0	0	0	0	0	0		0
ago	0	0	0	0	0	0		0
set	0	0	0	0	0	0		0
Total ano hidrológico	10 576 373	35 811 020	44 115 408	25 360 579	35 362 169	4 147 772	18 548 225	173.9 M

Analisando visualmente os valores tabelados, pode observar-se que aos anos hidrológicos de 2012/13, 2013/14 e 2015/16 corresponderam volumes descarregados bastante elevados. Contrariamente, os anos 2011/12 e 2016/17 exibem volumes descarregados baixos. Do ponto de vista mensal, janeiro revela-se como o mês com mais elevados valores de volume descarregado, representando 22,69% do volume total

anual. Ao invés constata-se que nos meses de julho, agosto e setembro nunca foram efetuadas descargas desde que a barragem se encontra em exploração.

4.3.2. DESCARREGADOR DE FUNDO

A descarga de fundo da barragem de Pretarouca é regulada por intermédio de uma comporta plana corrediça, colocada imediatamente a montante da transição entre uma conduta de secção quadrada para outra de secção circular. Dependendo do grau de abertura da comporta de regulação de caudal e do nível da água da albufeira, a descarga de fundo poderá funcionar integralmente em pressão ou ter um troço intermédio com escoamento em superfície livre na zona que se segue à comporta.

A fórmula que permite o cálculo da vazão é dada pela equação (4.4):

$$Q = Cab\sqrt{2g(H - Ca)} \quad (4.4)$$

Sendo que, Q representa o caudal descarregado (m^3/s), a é a abertura da comporta (m), b é a variável que corresponde à largura da comporta (0,8 m). H , representa a carga hidráulica sobre a soleira em que a comporta assenta quando se encontra fechada, correspondente ao desnível entre o nível da água da albufeira (N) e a cota de fundo da conduta na entrada da comporta (901), deduzida das perdas de carga entre a albufeira e a comporta. Por último, C equivale ao coeficiente de contração do escoamento.

O coeficiente de contração do escoamento foi determinado com base no ábaco apresentado na Figura 30:

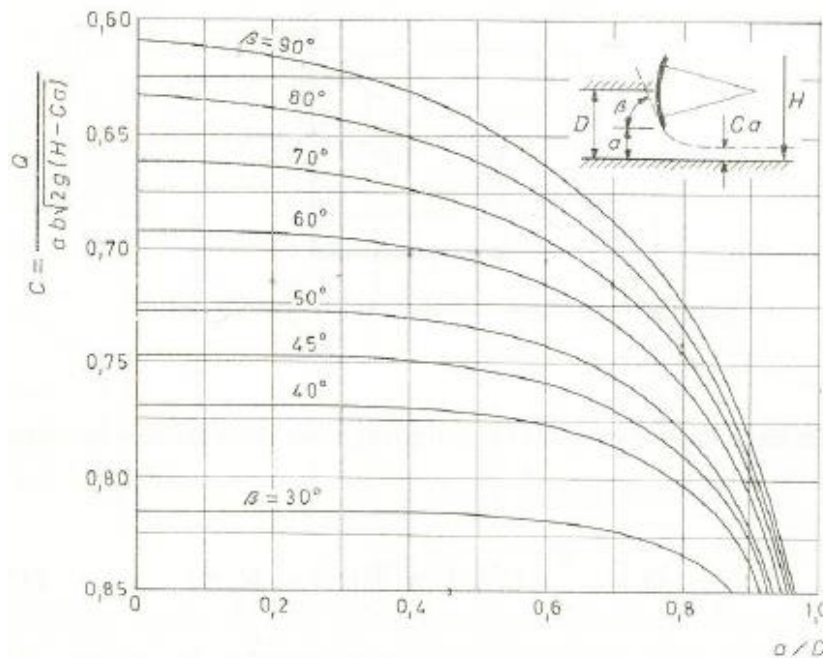


Figura 30 – Vazão de um orifício retangular controlado por uma comporta (Quintela, 2011)

Os valores a obter são dependentes dos diversos graus de abertura da comporta. No caso em estudo, para $D=1,30$ metros (altura da comporta) e $\beta = 90^\circ$ visto tratar-se de uma comporta plana, resultam os coeficientes de contração, apresentados na Tabela 11:

Tabela 11 - Coeficientes de contração para diferentes graus de abertura da comporta

a/D	abertura (m)	Coeficiente de contração
0	0	0
10	0,13	0,615
20	0,26	0,62
30	0,39	0,625
40	0,52	0,63
50	0,65	0,645
60	0,78	0,665
70	0,91	0,685
80	1,04	0,725
90	1,17	0,78
100	1,3	1

A Figura 31 sintetiza o processo de cálculo seguido para a determinação dos volumes descarregados pelo descarregador de fundo. Será de referir que este órgão hidráulico apenas foi utilizado periodicamente para testar a operacionalidade do mesmo.

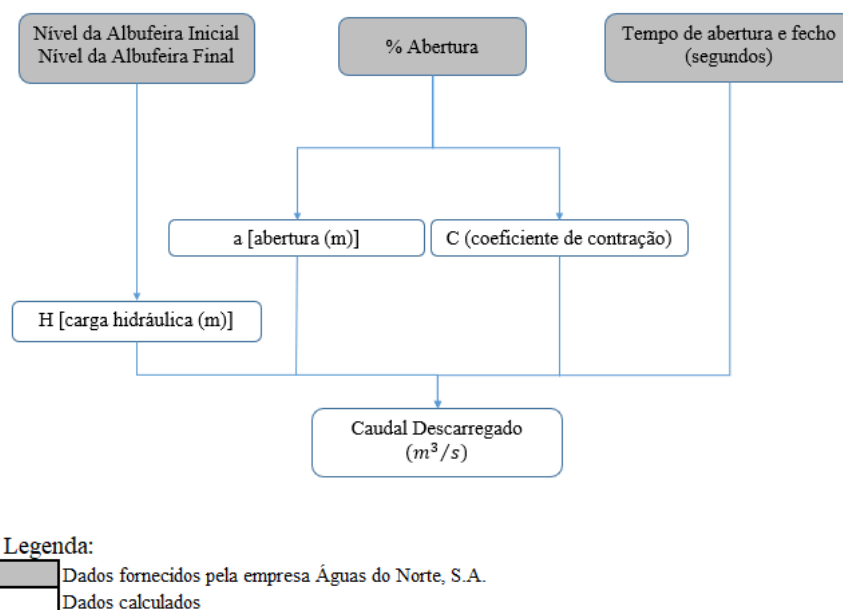


Figura 31 - Esquema de cálculo dos caudais descarregados pela descarga de fundo

Na Tabela 12, numeram-se os volumes totais descarregados através do descarregador de fundo da barragem, determinados com base nos registos horários dos níveis de água da albufeira de Pretarouca e nos períodos de abertura da comporta, desde 01/10/2011 até 01/06/2018.

Tabela 12 - Volume descarregado mensalmente pela descarga de fundo, a partir de 01/10/2011

Meses	Volume descarregado pelo descarregador de fundo (m³)							Total Período
	2011/12	2012/13	2013/14	2014/15	2015/16	2016/17	2017/18	
out	0	0	0	0	0	0	0	0
nov	0	0	0	0	0	0	0	0
dez	0	579 472	0	0	0	0	0	579 472
jan	0	0	839 225	0	0	0	0	839 225
fev	0	0	0	0	171 494	1 985 089	0	2 156 583
mar	0	375 701	0	0	0	0	191 009	566 711
abr	0	0	0	0	0	0	0	0
mai	0	0	0	0	0	0	0	0
jun	0	0	0	0	0	0		0
jul	0	0	0	0	0	0		0
ago	0	0	0	0	0	0		0
set	0	0	0	0	0	0		0
Total Ano Hidrológico	0	955 174	839 225	0	171 494	1 985 089	191 009	4 141 991
% anual para o período	0,00%	23,06%	20,26%	0,00%	4,14%	47,93%	4,61%	100,00%

Analisando os volumes descarregados, verifica-se que a operacionalidade da descarga de fundo foi periodicamente verificada. A sua utilização decorre de planeamento previsto sendo habitual ocorrer no início de cada ano.

De salientar que o mês de fevereiro do ano de 2017, apresenta o maior volume descarregado que ocorreu, evidenciando valores ligeiramente superiores a 50% do total descarregado pela descarga de fundo, desde que a albufeira se encontra em exploração.

4.3.3.ABASTECIMENTO DE ÁGUA

Como referido ao longo do presente trabalho, a tomada de água para abastecimento urbano, localiza-se dentro do corpo da barragem e possui um circuito hidráulico parcialmente comum ao circuito de caudal ecológico.

Os volumes de água totais a extrair da albufeira de Pretarouca, para alimentar o sub-sistema de abastecimento urbano do Rio Balsemão, foram previamente fixados nos estudos realizados, no âmbito do “Plano Geral de Abastecimento de Água e Saneamento de Trás-os-Montes e Alto Douro”. Nesse plano foi previsto que o sistema de abastecimento a abranger pela albufeira de Pretarouca, abrangesse 5 concelhos (Tabela 13). Entretanto, o sistema de abastecimento realizado só veio a abranger 3 dos 5 concelhos em análise, correspondendo a 70% da população prevista abastecer.

Tabela 13 - População em estudo (Águas do Norte, 2018)

Concelhos	População Prevista Abastecer em 2011	População Prevista Abastecer 2017	População Abastecida 2017	% Pop. Abastecida
Lamego	22 863	23 347	22 095	96%
Resende	9 322	9 167	8 676	96%
Tarouca	6 228	6 402	6 059	96%
Castro Daire	9 986	9 734	0	0%
Vila Nova de Paiva	4 711	4 343	0	0%
TOTAL	53 110	52 993	36 830	70%

Na realidade, ao longo do tempo de exploração da albufeira de Pretarouca (Tabela 14) tem-se vindo a ver um aumento progressivo da população abastecida daqueles 3 concelhos, correspondendo ao alargamento e expansão do sistema de abastecimento.

Tabela 14 - Evolução da quantidade de população abastecida pela albufeira de Pretarouca (Águas do Norte, 2018)

Ano Hidrológico	População Abastecida
2011/12	13 085
2012/13	14 413
2013/14	16 587
2014/15	19 069
2015/16	32 914
2016/17	36 830

Uma vez que os volumes captados para abastecimento urbano são monitorizados por medidores instalados na ETA do Balsemão, puderam ser descritos os valores dos volumes captados para abastecimento urbano apresentados na íntegra na Tabela 15.

Tabela 15 - Volume captado mensalmente, a partir de 01/10/2011

Meses	Volume captado para abastecimento urbano (m³)							Total Período	% mensal para o período
	2011/12	2012/13	2013/14	2014/15	2015/16	2016/17	2017/18		
Out	96 164	66 640	103 141	104 360	164 110	233 764	264 994	1 033 173	9,48%
Nov	84 576	53 899	86 643	85 579	154 749	184 461	249 409	899 316	8,25%
Dez	70 052	59 855	85 745	83 736	170 279	170 718	218 893	859 278	7,89%
Jan	64 338	73 466	66 805	78 984	162 213	174 645	165 754	786 205	7,22%
Fev	50 722	32 238	55 399	68 141	145 801	152 832	153 245	658 378	6,04%
Mar	54 291	50 108	58 746	84 672	170 555	172 206	169 444	760 022	6,98%
Abr	43 550	61 691	62 123	90 835	157 529	189 869	172 725	778 322	7,14%
Mai	41 714	78 742	104 300	109 053	172 278	204 731	198 725	909 543	8,35%
Jun	53 774	98 162	110 544	122 559	204 252	251 232		840 523	7,72%

Jul	93 093	134 809	142 996	170 648	256 485	266 789		1 064 820	9,77%
Ago	133 065	161 132	149 573	174 010	287 704	306 482		1 211 966	11,12%
Set	130 454	137 986	134 894	162 032	257 595	269 905		1 092 866	10,03%
Total Ano Hidrológico	915 793	1 008 728	1 160 909	1 334 609	2 303 550	2 577 634	1 593 189	10.89M	100,00%
% anual para o período	8,41%	9,26%	10,66%	12,25%	21,14%	23,66%	14,62%	100,00%	

Evidencia-se um crescente aumento do valor respeitante ao abastecimento urbano de ano para ano, mais marcante a partir do ano de 2014/15. É fundamental, também, salientar que os meses mais quentes apresentam valores significativamente mais elevados.

Uma vez que a população abastecida em 2016/17 foi de 36830 habitantes (Tabela 14), através dos volumes captados nesse mesmo ano, pôde ser determinada a capitação correspondente por habitante. Tendo em consideração que os volumes mensal e anualmente captados contabilizados a partir da ETA do Balsemão correspondem a um total anual de 2 577 634 m³, torna-se possível obter a capitação equivalente (Figura 33).

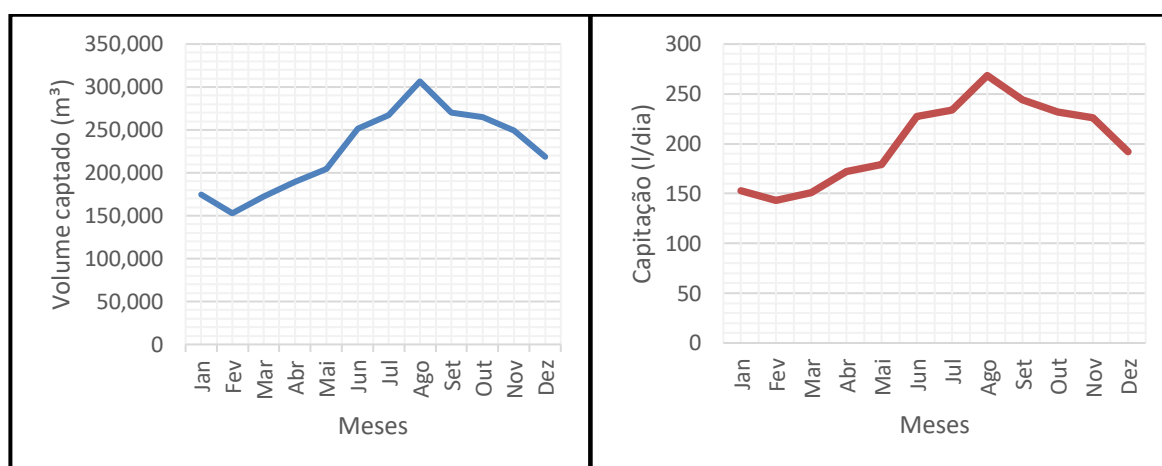


Figura 32 - Volumes captados (m³) e correspondentes capitações no ano hidrológico 2016/17

4.3.4.CIRCUITO DE DESCARGA DE CAUDAIS ECOLÓGICOS E SISTEMA DE “BY-PASS”

Os caudais ecológicos mínimos de base, a garantir a continuidade a jusante da barragem de Pretarouca, são fixados na DIA (Declaração de Impacte Ambiental), e nesse contexto, foi estabelecido um programa de descargas de caudal ecológico a cumprir.

Na Tabela 16 é apresentado um programa a cumprir em anos médios húmidos, sendo similarmente definido um programa a cumprir em anos secos, ou anos abaixo da média, correspondendo a um programa mais reduzido (Tabela 17). Este programa, calculado com base nas afluências do ano 1989/90, que corresponde a 2/3 dos valores apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 - Programa de caudais ecológicos mínimos a garantir em anos médios e húmidos

Mês	Q (l/s)	Vol (10 ³ m ³)
out	85	227,66
nov	165	427,68
dez	232	621,39
jan	278	744,6
fev	209	505,61
mar	187	500,86
abr	173	448,42
mai	158	423,19
jun	98	254,02
jul	98	262,48
ago	71	190,17
set	55	142,56

Tabela 17 - Programa de caudais ecológicos mínimos a garantir, em anos abaixo da média

Mês	Q (l/s)	Vol (10 ³ m ³)
out	56,67	151,78
nov	110	285,12
dez	154,67	414,26
jan	185,33	496,4
fev	139,33	337,08
mar	124,67	333,91
abr	115,33	298,94
mai	105,33	282,12
jun	65,33	169,34
jul	65,33	174,99
ago	47,33	126,78
set	36,67	95,04

De forma a assegurar a descarga de caudal ecológico, são utilizados dois dispositivos: o circuito de descarga de caudal ecológico e o sistema de “By-Pass”. É imprescindível que os valores mínimos sejam sempre alcançados, de forma a cumprir o funcionamento exigido.

No troço correspondente à descarga de caudal ecológico, apenas foi medida e ponderada a leitura dos caudais registados no circuito em paralelo responsável (Figura 33), a partir de 01/04/2014 até 01/06/2018, sendo os correspondentes volumes representados na Tabela 18.

Tabela 18 – Volume descarregado pela Descarga de Caudal ecológico (m³)

Meses	Volume descarregado pelo circuito de caudal ecológico (m³)					Total Período	% mensal no período
	2013/14	2014/15	2015/16	2016/17	2017/18		
out	0	27	54	206 344	98 217	304 641	13,47%
nov	0	52	52	48 236	19 440	67 780	3,00%
dez	0	54	54	54	20 088	20 249	0,90%
jan	0	110 365	95 324	56 921	96 547	359 157	15,88%
fev	0	48	60 148	10 306	0	70 502	3,12%
mar	0	54	54	54	0	161	0,01%
abr	52	52	52	52	0	207	0,01%
mai	54	54	134	54	0	295	0,01%
jun	66 977	130	52	52		67 211	2,97%
jul	26 409	142 330	205 755	1 687		376 181	16,63%
ago	45 131	207 201	269 206	81 263		602 801	26,65%
set	64 308	88 491	167 676	72 654		393 129	17,38%
Total ano hidrológico	202 930	548 856	798 559	477 675	234 292	2 262 313	100,00%
% anual no período	8,97%	24,26%	35,30%	21,11%	10,36%	100,00%	



Figura 33 - Circuito em paralelo responsável pela descarga de caudal ecológico

Por sua vez, o sistema de “By-Pass” foi concebido para satisfazer um sistema de transposição da fauna, nomeadamente a toupeira-de-água e a passagem de peixes, com a finalidade de simular um curso de água alternativo ao leito do rio Balsemão. Funciona de forma permanente e permite derivar das afluições à albufeira um caudal de dimensionamento de 155 litros por segundo.

O caudal derivado pelo sistema de “By-Pass” é monitorizado através de sondas situadas na escada de peixes (Figura 34) o que permite contabilizar a totalidade de volume que atinge a restituição desviada através da mesma (Tabela 19).

Tabela 19 - Volume contabilizado mensalmente pelo sistema de "By-Pass", a partir de 01/10/2011

Meses	Volume contabilizado pelo sistema de "By-Pass"							Total Período
	2011/12	2012/13	2013/14	2014/15	2015/16	2016/17	2017/18	
out	0	0	0	413 683	308 016	0	0	721 699
nov	0	440 640	303 696	399 168	472 781	0	0	1 616 285
dez	0	558 144	306 634	617 674	656 208	776 736	0	2 915 395
jan	0	378 000	207 360	88 906	200 880	26 784	0	901 930
fev	0	393 984	489 888	467 597	428 544	415 152	374 976	2 570 141
mar	0	435 456	374 976	0	372 557	482 112	417 830	2 082 931
abr	0	410 659	356 918	260 410	401 760	374 976	401 760	2 206 483
mai	0	537 667	466 560	366 941	338 256	455 328	415 152	2 579 904
jun	0	432 605	275 789	272 160	335 664	180 624		1 496 842
jul	0	0	296 093	139 104	145 152	141 113		721 462
ago	0	0	23 328	0	0	0		23 328
set	0	0	27 216	204 336	0	0		231 552
Total Ano Hidrológico	0	3 587 155	3 128 458	3 229 978	3 659 818	2 852 825	1 609 718	18 067 952
% anual no período	0,00%	19,85%	17,31%	17,88%	20,26%	15,79%	8,91%	100,00%

Posto isto, é registado o volume total calculado pelos dois circuitos responsáveis pela descarga do caudal ecológico representado na Tabela 20.

Tabela 20 - Volume descarregado mensalmente pelos circuitos de caudal ecológico (m³) no período compreendido entre 2013/14 e 2017/18

Meses	Volume do caudal ecológico descarregado (m³)					Total Período	% mensal no período
	2013/14	2014/15	2015/16	2016/17	2017/18		
out	0	413 710	308 070	206 344	98 217	1 026 340	6,13%
nov	479 520	399 220	472 833	275 036	19 440	1 646 048	9,83%
dez	505 440	617 727	656 262	776 790	20 088	2 576 306	15,39%
jan	552 960	491 389	497 084	458 681	498 307	2 498 421	14,92%
fev	349 920	387 812	435 124	425 458	374 976	1 973 289	11,79%
mar	374 976	54	319 388	401 814	401 760	1 497 991	8,95%
abr	264 436	260 461	294 676	375 028	401 760	1 596 361	9,53%
mai	466 614	366 994	338 390	415 206	415 152	2 002 355	11,96%
jun	342 766	272 290	335 716	180 676		1 131 448	6,76%
jul	322 502	281 434	350 907	142 800		1 097 643	6,56%
ago	68 459	207 201	269 206	81 263		626 129	3,74%
set	91 524	292 827	167 676	72 654		624 681	3,73%
Total ano hidrológico	3 819 116	3 991 119	4 445 330	3 811 748	2 229 700	16 743 109	100,00%
% anual no período	22,81%	23,84%	26,55%	22,77%	13,32%	100,00%	

Em modo de operação do caudal derivado pelo sistema de “By-Pass”, monitorizado pelas sondas (Figura 34), sucede-se o seguinte funcionamento:

- Se eventualmente, o caudal proveniente pelo sistema de “By-Pass” for inferior ao caudal ecológico mínimo a garantir em permanência, apresentado nas tabelas 15 e 16, a descarga de caudal ecológico entra automaticamente em funcionamento, de forma a completar o valor total mínimo exigido.
- Se o caudal derivado pelo sistema de “By-Pass” for igual ou superior ao caudal ecológico mínimo implementado nas Tabelas 16 e 17, a descarga de caudal ecológico permanecerá fechada, dado que o sistema de “By-Pass” estará a fornecer tanto ou mais que o mínimo exigido.



Figura 34 - Sondas que contabilizam o caudal escoado na escada de peixes

4.3.5. CAUDAIS PERCOLADOS

A determinação dos caudais infiltrados ou percolados é realizada, de forma indireta, por intermédio do controlo de um sistema de bombagem (Figura 35), instalado na galeria de injeções e drenagem da fundação da barragem.

As águas captadas na galeria de drenagem são conduzidas por caleiras até dois poços de bombagem. Em cada um destes poços, encontram-se instaladas duas bombas submersíveis, capazes de elevar um caudal de 5 l/s a 26,1 metros de altura manométrica.

A altura manométrica para cada uma das bombas foi estabelecida tendo em conta a ordem de grandeza da altura da barragem, visto que os caudais de infiltração são enviados de volta para montante da barragem.

De acordo com a determinação dos volumes percolados, estes têm vindo a ser da mesma ordem de grandeza anual o que aponta para um comportamento idêntico da barragem. Os valores percolados (Tabela 21) foram assim considerados iguais para todos os anos em estudo.

Tabela 21 - Volumes bombados provenientes da percolação

Ano Hidrológico	Volume bombado (m³)
2011/12	7 068,41 m³
2012/13	7 068,41 m³
2013/14	7 068,41 m³
2014/15	7 068,41 m³
2015/16	7 068,41 m³
2016/17	7 068,41 m³
2017/18	7 068,41 m³



Figura 35 - Bombas responsáveis pelo lançamento dos caudais infiltrados para montante

4.3.6. VOLUMES EVAPORADOS PELA ALBUFEIRA

Na determinação da evaporação a partir da água em superfície livre, utilizou-se o método combinado da fórmula de Penman, correspondente à combinação entre os métodos energético e aerodinâmico. Dado que os valores estimados pela evaporação são pouco significativos no balanço final, foram considerados apenas os valores de um ano médio. O presente trabalho dá ênfase ao procedimento utilizado por Lencastre e Branco (2010), pela acessibilidade de cálculo dos dados intervenientes. A partir destas considerações e por simples transformações matemáticas, Penman apresentou a equação (4.6), considerando $p=1000$ mb:

$$E = \frac{H\Delta + AE_a}{\Delta + A} \quad (4.6)$$

Em que, E é a evaporação (cm/dia), H é a radiação útil manifestada em altura de evaporação (cm/dia), Δ corresponde ao declive da curva de tensão de vapor para a temperatura média do ar ($\text{Pa } ^\circ\text{C}^{-1}$), A aponta à constante psicrométrica ($\sim 0,66 \text{ mb}/^\circ\text{C}$) e E_a é o poder evaporante do ar (cm/dia).

A radiação útil, H , pode ser expressa pela equação (4.7):

$$H = \frac{Q_n}{\rho l} \quad (4.7)$$

Dado que, Q_n corresponde à radiação total que não é refletida nem irradiada, tomando a caracterização de radiação útil do ponto de vista da evaporação, pode ser calculado através da expressão de Szeicz – equação (4.8) – dado em ($\text{cal}/\text{cm}^2 \cdot \text{dia}$) (Szeicz, 1974):

$$Q_n = 0,890Q_s - 56 \quad (4.8)$$

ou,

$$Q_n = Q_s - Q_{sr} - Q_{lw} \quad (4.9)$$

Sendo, Q_s a radiação solar incidente ou radiação global, Q_{sr} é a radiação solar refletida e Q_{lw} corresponde à radiação da massa de água para a atmosfera sob a forma de ondas longas. Ambas as variáveis são transmitidas em ($\text{cal}/\text{cm}^2 \cdot \text{dia}$).

No cálculo da radiação solar incidente ou radiação global (Q_s) tem-se em consideração um parâmetro intitulado como constante solar e designa-se pela quantidade de energia solar que atinge o início da atmosfera terrestre, caracterizada em função da latitude e do mês verificada na Tabela 22, por I_o .

Tabela 22 – Radiação solar média recebida num plano horizontal no limite superior da atmosfera - I_o ($\text{cal}/\text{cm}^2 \cdot \text{dia}$) (Lencastre e Branco, 2010)

Latitude	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
90 °N	-	-	-	465	880	1070	930	660	155	-	-	-
80 °N	-	-	105	460	860	1050	970	625	235	10	-	-
70 °N	-	65	255	540	800	1000	870	670	400	140	5	-
60 °N	75	205	400	655	860	975	925	750	500	275	110	55
50 °N	200	350	540	750	910	985	950	820	620	430	155	175
40 °N	355	490	650	820	880	985	960	870	740	550	395	325
30 °N	500	620	750	870	945	975	955	900	795	670	540	465
20 °N	640	725	820	895	930	930	930	900	850	760	660	610
10 °N	755	820	870	895	885	870	870	885	880	830	770	730
0	855	885	895	970	820	790	795	840	880	885	860	840
10 °S	930	930	885	810	730	685	705	770	845	900	920	930
20 °S	985	940	855	740	630	570	595	680	790	900	965	990
30 °S	1015	930	800	640	505	445	465	575	725	870	985	1030
40 °S	1020	895	715	525	375	305	335	450	630	810	960	1045
50 °S	1000	835	620	400	240	175	200	315	505	735	950	1040

Na medição direta da radiação global (Q_s), utilizam-se diversos aparelhos como os Pireliómetros e os Piranómetros. Contudo, na ausência destes aparelhos, é determinada indiretamente a partir da insolação ao longo do dia, alcançada por heliógrafos.

Para se conseguir converter os valores fornecidos pelos heliógrafos em valores de Q_s (cal/cm².dia), aplica-se a equação (4.10) de Angström (Meza e Varas, 2000):

$$Q_s = I_o \times \left(a + b \times \frac{n}{N} \right) \quad (4.10)$$

em que:

- I_o – Constante solar;
- n – Número de horas de insolação dadas pelo aparelho;
- N – Número máximo de horas possíveis ao Sol;
- a, b – Parâmetros de ajustamento locais.

Segundo Dunne e Leopold (1978), a duração da insolação mensal máxima possível é dada pela Tabela 23, em H (horas), em função da latitude local e do mês em que se encontra.

Tabela 23 – Número máximo de horas ao sol em função da latitude (Lencastre e Branco, 2010)

Latitude	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
50 °N	265	280	366	415	480	490	495	450	380	330	274	252
40 °N	303	300	370	400	445	450	455	425	375	345	300	290
30 °N	324	314	370	388	425	420	430	410	370	353	320	316
20 °N	341	324	370	378	407	400	410	400	366	360	335	338
10 °N	360	327	370	370	390	980	390	385	366	366	352	356
0	375	340	363	363	375	363	375	375	363	375	363	375
10 °S	388	350	355	355	363	346	360	364	360	380	378	396
20 °S	410	360	350	350	346	328	340	344	360	388	393	414
30 °S	430	370	342	342	330	306	328	345	360	404	410	435
40 °S	466	380	334	334	310	280	302	330	360	415	432	463
50 °S	490	403	320	320	276	242	266	315	356	427	465	508

Devido à inconsistência e ausência de informação credível, foi necessário retirar informações relativas ao número de horas de insolação, e recorreu-se a um outro método que relaciona a nebulosidade e a insolação. A nebulosidade mede a fração do céu coberta por nuvens, e é determinada por observações diretas (Lencastre e Branco, 2010). Através das percentagens de nebulosidade fornecidas pelo website

Weather Avenue, é necessário verificar o valor de insolação mensal em conformidade com a Tabela 24 e 25, dada por Lencastre e Branco (2010):

Tabela 24 - Relação entre a Nebulosidade (décimos) com a insolação. (Lencastre e Branco, 2010)

Nebulosidade-décimos	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Insolação (n/N)	0,95	0,85	0,8	0,75	0,65	0,55	0,5	0,4	0,3	0,15	-

Tabela 25 - Nebulosidade média mensal na região de Lamego e correspondente insolação. ((*Weather Avenue*) e (Lencastre e Branco, 2010))

Meses	Nebulosidade Média (%)	Nebulosidade Média (Décimos)	Insolação (n/N)
jan	58,45	5,85	0,508
fev	51,14	5,11	0,544
mar	45,52	4,55	0,595
abr	44,00	4,40	0,610
mai	36,29	3,63	0,687
jun	23,17	2,32	0,784
jul	19,71	1,97	0,801
ago	17,19	1,72	0,814
set	20,20	2,02	0,799
out	36,03	3,60	0,690
nov	44,00	4,40	0,610
dez	44,00	4,40	0,610

Os valores dos parâmetros - a, b – são dependentes do local em estudo. Correspondem a valores de constantes empíricas da fórmula de Angström e são designadas pela Tabela 26:

Tabela 26 – Constantes de Angström

Local	a	b
Mundo	0,23	0,48
Mundo	0,29 cos. Lat.	0,52
Inglaterra S.E.	0,18	0,55
Virgínia (EUA)	0,22	0,54
Camberra (Austrália)	0,25	0,54
Brisbane (Austrália)	0,23 a 0,35	0,38 a 0,54
África Ocidental	0,12 a 0,26	0,39 a 0,50

A radiação solar refletida, Q_{sr} , é resultado do produto entre a radiação global, Q_s , e o coeficiente albedo, expresso pela equação (4.11):

$$Q_{sr} = r \times Q_s \quad (4.11)$$

Este coeficiente é medido por um pireliómetro que se orienta para a superfície de reflexão, e depende da cobertura vegetal. Normalmente, é utilizado o valor de 0,06 para a água. Segundo Oliveira (2010), o valor do albedo é expresso pela Tabela 27:

Tabela 27 – Albedo em função da cobertura vegetal

Cobertura Vegetal	r(albedo)
Água	0,05 - 0,08
Floresta alta	0,11 - 0,16
Culturas altas	0,15 - 0,20
Cultura de cereais	0,20 - 0,26
Culturas baixas	0,20 - 0,26
Pastagens ou relva	0,20 - 0,26
Solo nú	0,10(hum) - 0,35(seco)
Neve e gelo	0,20(velha) - 0,80(nova)

A radiação de ondas largas, Q_{lw} , é definida pelo calor acumulado na terra que irradia para a atmosfera sob a forma de ondas longas. A intensidade da radiação terrestre é dependente essencialmente da temperatura da superfície terrestre, da tensão de vapor e das nuvens que podem retransmitir parte da energia irradiada para a Terra. Existem várias equações empíricas, mas uma das mais utilizadas é dada por Chang, expressa por Lencastre e Branco (2010):

$$Q_{lw} = \sigma T_a^4 (0.56 - 0.08 \sqrt{e_a}) (0.10 + 0.9 n/N) \quad (4.12)$$

em que:

- $\sigma = 1,17 \times 10^{-7} \text{ cal/cm}^2 \text{ K}^4 \text{ dia}$ – Constante de Boltzmann;
- T_a – Temperatura do ar ($^{\circ}\text{K}$);
- e_a – Tensão de vapor a 2 metros do solo (mb);
- n – Número de horas de insolação dadas pelo aparelho;
- N – Número máximo de horas possíveis ao Sol;

A temperatura do ar foi retirada da plataforma da *WeatherSpark.com* pertencente à empresa Cedar Lake Ventures, Inc., que dispõe de vários gráficos baseados em dados meteorológicos dos últimos anos. Através da Figura 36, é possível verificar as temperaturas médias mensais máximas e mínimas e, posteriormente, tabelar os vários dados (Tabela 28).

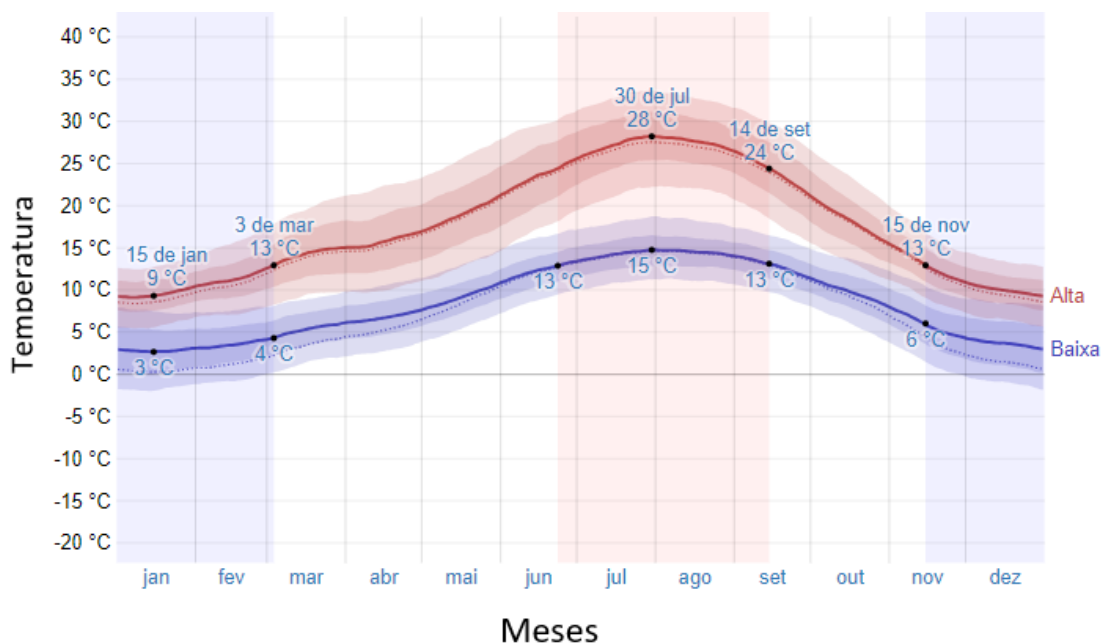


Figura 36 – Esquema da temperatura média mensal máxima e mínima no concelho de Lamego, Viseu [3]

Tabela 28 - Temperaturas médias mensais mínimas e máximas em Lamego, Viseu [3]

Temperaturas	jan.	fev.	mar.	abr.	mai.	jun.	jul.	ago.	set.	out.	nov.	dez.
Temp. Média (°C)	7	7,9	10,3	12,4	14,6	18,6	21,1	21,2	19	14,8	10,2	7,3
Temp. Mínima (°C)	3,3	3,7	6	7,5	9,6	12,9	14,7	14,8	13,3	10,1	6,4	3,8
Temp. Máxima (°C)	10,7	12,2	14,6	17,3	19,6	24,4	27,5	27,7	24,7	19,6	14,1	10,9

Definindo um declive Δ , relacionado com a variação da tensão de vapor saturado em função da temperatura do ar, dada pela equação (4.13):

$$\Delta = \frac{e_a^* - e_d}{T_a - T_d} \quad (4.13)$$

em que:

- e_a^* – Tensão de saturação de vapor para uma temperatura média do ar, T_a (mb);
- e_d – Tensão de saturação de vapor à temperatura do ponto de orvalho, T_d (mb).

Em alternativa, Lencastre e Branco (2010) apresentam um gráfico que relaciona o declive da curva, Δ em função da temperatura do ar dado pela Figura 37:

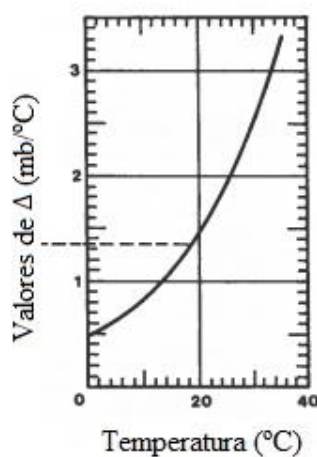


Figura 37 - Variação dos valores de Δ com a temperatura para $p=1000$ mb (Lencastre e Branco, 2010)

Por último, a expressão de cálculo da evaporação que apresenta cariz aerodinâmico demonstrada por Lencastre e Branco (2010) é expressa pela equação (4.14):

$$E_a = (0.013 + 0.00016 \times u_2) \times [e_s(T_s) - e(T_a)] \quad (4.14)$$

tendo em conta que a u_2 corresponde à velocidade do vento (km/dia), normalmente medida a dois metros do solo e as restantes variáveis já caracterizadas anteriormente.

Identicamente à disposição das temperaturas médias, obtiveram-se através da plataforma do WeatherSpark, os valores referentes à velocidade média do vento, medido a 2 metros do solo. Como se verifica na Figura 38, é possível afirmar que a velocidade média do vento varia entre 9 e 11 km/h.

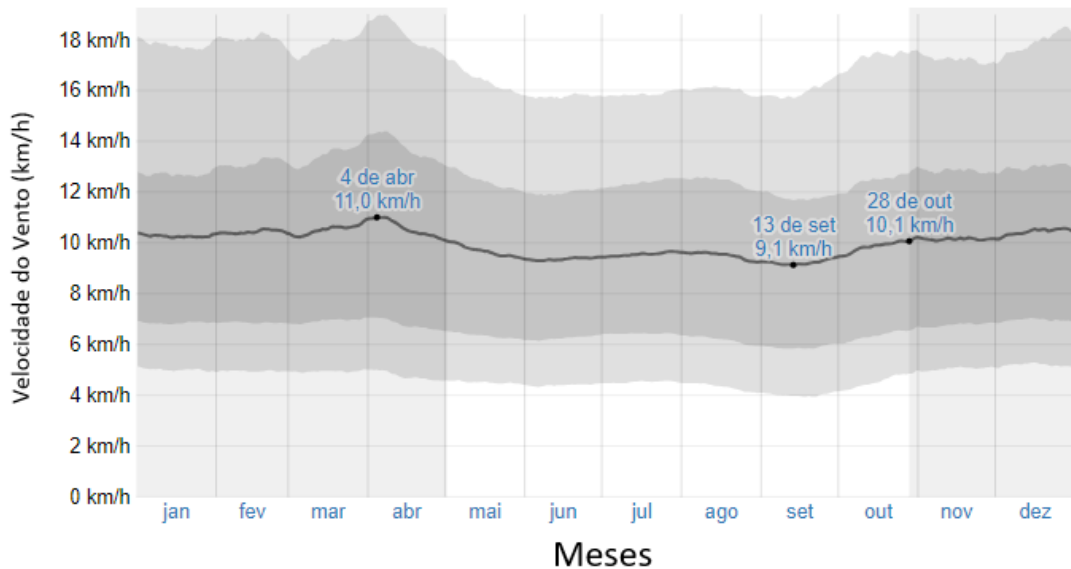


Figura 38 - Velocidade média do vento para a região de Lamego, Viseu (km/hora) [3]

Após a aplicação de todas as operações anteriormente descritas, aprontam-se os valores sintetizados correspondentes à evaporação da água para a região de Lamego com base nos dados meteorológicos médios dos últimos anos, expressos na Tabela 29:

Tabela 29 - Resultados do método combinado segundo a fórmula de Penman

Meses	Evaporação (cm/dia)	Evaporação (mm/mês)
jan.	0,115	35,69
fev.	0,185	57,49
mar.	0,293	90,81
abr.	0,402	124,67
mai.	0,496	153,87
jun.	0,668	206,95
jul.	0,722	223,78
ago.	0,672	208,25

Meses	Evaporação (cm/dia)	Evaporação (mm/mês)
set.	0,527	163,42
out.	0,306	94,81
nov.	0,162	50,22
dez.	0,119	36,75

Atendendo aos resultados apresentados, determinam-se os volumes evaporados em cada mês, resultando um total anual de 1446,8 mm para a região de Lamego. Aplica-se posteriormente o produto da evaporação calculada (m/mês) e a área inundada média na albufeira no mês em questão. Recorrendo à Tabela 4, alusiva à curva das áreas inundadas, e através dos níveis da albufeira horários, verificam-se os resultados expostos na Tabela 30.

Tabela 30 - Volume evaporado mensalmente (m³) a partir de 01/10/2011

Meses	Volume evaporado (m³)							Total Anual	% mensal no período
	2011/12	2012/13	2013/14	2014/15	2015/16	2016/17	2017/18		
out	31 076	34 122	31 005	38 331	33 147	26 623	28 609	222 913	5,82%
nov	17 589	20 209	21 985	21 985	22 026	11 838	13 675	129 308	3,37%
dez	16 116	16 131	16 087	16 161	16 042	11 907	9 049	101 493	2,65%
jan	15 637	15 811	15 883	15 637	15 680	15 448	14 000	108 096	2,82%
fev	24 723	25 283	25 470	25 493	25 190	25 166	25 073	176 398	4,60%
mar	39 643	39 938	39 975	39 938	39 938	39 717	40 455	279 606	7,30%
abr	54 276	55 947	54 985	54 428	54 783	54 580	54 935	383 934	10,02%
mai	67 613	67 425	67 300	67 238	67 300	66 925	67 363	471 166	12,30%
jun	90 180	90 264	90 432	89 928	90 516	89 760		541 081	14,12%
jul	97 057	95 784	96 966	95 148	96 602	92 973		574 530	14,99%
ago	85 357	82 248	86 939	81 237	75 817	80 460		492 058	12,84%
set	59 548	58 288	66 311	57 395	53 076	56 713		351 332	9,17%
Total Ano Hidrológico	598 815	601 451	613 340	602 920	590 117	572 111	253 159	3 831 914	100,00%

A metodologia desenvolvida e os resultados correspondentes aos valores da evaporação, encontram-se no Anexo B.

4.4. AFLUÊNCIAS À ALBUFEIRA DE PRETAROUCA

A determinação dos valores concernentes às afluências que provém à albufeira de Pretarouca é realizada por meio da fórmula descrita no método da simulação, exposto no capítulo 2. O mesmo desenvolve aplicabilidade do balanço hídrico, dado pela da equação (4.15):

$$S_{t+1} = S_t + Q_t - D_t - E_t + P_t - L_t \quad (4.15)$$

em que, S_t e S_{t+1} correspondem aos volumes de armazenamento no início dos períodos t e $t + 1$, respetivamente, com $t + 1 = t + \Delta t$. No presente caso, fez-se a análise mensal em que S_t corresponde ao volume armazenado no dia 1 do início de cada mês, e S_{t+1} ao volume armazenado no último dia de cada mês.

As restantes variáveis representam alterações no volume de armazenamento durante este período de tempo. É refletido e objetivado que se considere apenas uma incógnita correspondente à afluência total que provém à albufeira, dada por, $Q_{total} = Q_t + P_t$, sendo que Q_t é o volume afluente à albufeira, proveniente do escoamento no curso de água e P_t é o volume afluente proveniente da precipitação incidente na albufeira.

Por sua vez, D_t é o volume relativo à procura exigida pela população respeitante ao abastecimento urbano. E_t representa o volume das perdas por evaporação e L_t , são outras perdas na albufeira, que neste presente caso refletem as descargas pelo descarregador de cheias, descargas de fundo e caudais percolados.

Após caracterizada e exposta a análise mensal de cada ano hidrológico, é sintetizado o resultado final (Tabela 31) dos volumes afluentes à albufeira de Pretarouca.

Tabela 31 - Volume mensal afluente à albufeira de Pretarouca, a partir de 01/10/2011

Meses	Volume afluente à albufeira de Pretarouca(m³)							Total	% mensal no período
	2011/12	2012/13	2013/14	2014/15	2015/16	2016/17	2017/18		
out	335 099	565 606	2 212 880	4 747 603	2 785 545	57 592	43 081	10 747 407	5,03%
nov	3 100 734	2 688 448	2 180 189	9 118 031	2 374 243	1 286 038	54 123	20 801 805	9,74%
dez	3 068 254	7 335 753	6 595 136	3 506 077	2 004 254	2 087 132	1 663 046	26 259 653	12,30%
jan	140 978	9 664 027	13 756 697	4 521 204	12 857 604	1 086 305	1 901 060	43 927 875	20,57%
fev	479 792	4 574 910	15 948 125	4 076 240	8 569 661	5 713 938	1 216 708	40 579 375	19,01%
mar	256 933	10 791 186	4 426 241	1 154 510	2 916 970	978 935	11 925 571	32 450 345	15,20%
abr	2 011 858	4 783 106	3 390 429	635 583	6 798 171	545 611	5 901 415	24 066 174	11,27%
mai	3 027 551	1 098 568	1 115 962	1 576 770	2 753 077	790 207	533 979	10 896 113	5,10%
jun	139 185	534 964	521 542	295 158	531 920	236 688		2 259 458	1,06%
jul	0	0	296 048	78 438	0	100 492		474 978	0,22%
ago	0	0	93 982	0	168 219	0		262 201	0,12%
set	139 865	0	211 125	437 331	0	0		788 321	0,37%
Total ano hidrológico	12 700 250	42 036 570	50 748 355	30 146 945	41 759 665	12 882 936	23 238 982	213 513 704	100,00%
% anual no período	5,95%	19,69%	23,77%	14,12%	19,56%	6,03%	10,88%	100,00%	

5

ANÁLISE E AVALIAÇÃO DE RESULTADOS

5.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

No presente capítulo desenvolvem-se procedimentos a considerar para aplicação ao caso de estudo, de acordo com a organização proposta nesta tese para a análise de melhorias de exploração da albufeira de Pretarouca.

Após a descrição do tratamento de dados desenvolvidos desde que a albufeira se encontra em exploração é, numa fase inicial, apresentada a análise comparativa entre os resultados adquiridos no trabalho e os previstos no estudo hidrológico histórico realizado no projeto. De seguida, é avaliado um evento hipotético correspondente face a 2 anos consecutivos com afluências idênticas ao ano mais seco observado durante o (ainda curto) período de exploração da albufeira, para diferentes valores de abastecimento urbano. Retiradas as conclusões destes eventos e após a verificação de falha no cumprimento das prioridades da albufeira – abastecimento de 100% - é efetuada uma simulação similar ao evento correspondente, com o acréscimo de um procedimento que consiste na subida do alteamento do descarregador de cheias.

Por fim, é realizada a idealização de um sistema de previsão e alerta de recursos hídricos, que consiste na avaliação das previsões com base em séries de precipitação de um período histórico de 30 anos e na avaliação da situação corrente na albufeira de Pretarouca, que por sua vez, constitui a definição de níveis de alerta face ao baixo nível da albufeira e a adoção de correspondentes medidas preventivas.

5.2. ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS RESULTADOS PREVISTOS EM PROJETO E OS OBTIDOS

O objetivo desta análise comparativa consiste na avaliação dos métodos utilizados no projeto e na metodologia aplicada, bem como a analogia efetuada com base na averiguação da compatibilidade entre os valores fixados em projeto e os valores observados na albufeira. Procede-se a uma análise dos elementos que, à priori, são definidos no início de um projeto: i) os volumes evaporados na albufeira; ii) volumes mínimos reservados para caudal ecológico; e iii) volumes derivados para abastecimento urbano. Finalmente é abordada uma comparação geral entre os volumes de escoamento afluentes observados e os volumes de escoamento anuais com base nas características anuais extremas previstas em projeto.

5.2.1. VALORES RESULTANTES DA EVAPORAÇÃO

O processo de análise dos resultados da evaporação realizado em projeto para avaliar as perdas por evaporação na albufeira foi baseado nos registos disponíveis da estação climatológica de Folgares, uma

vez que é a mais próxima da barragem de Pretarouca, dispondo de um evaporímetro de Piche. Decidiu-se em projeto, que os dados relativos às evaporações mensais e anuais nesta estação dever-se-iam considerar resultantes das medições da evaporação em tina da classe A, pressupondo serem mais próximos das condições reais comparativamente às medições realizadas com o evaporímetro de Piche. Nesse sentido optou-se em projeto, a utilização da equação (5.1) que correlaciona o evaporímetro de Piche e a evaporação em tina (CENOR, 2007).

$$E_{tina} = 915.245 + 0.422E_{piche} \quad (5.1)$$

Com base nos 12 anos de registos disponíveis na estação climatológica de Folgares é apresentado na tabela 32, o resultado dos cálculos das evaporações considerando que a distribuição mensal da evaporação em tina ao longo do ano segue uma lei percentual igual à determinada para a média dos 12 anos (1982/83 a 1994/95). De forma a obter as evaporações na albufeira, mês a mês, multiplicaram os valores médios mensais da evaporação de tina por coeficientes de tina, que permitem descontar o efeito de oásis, ainda que seja bastante incerto na determinação da evaporação.

Tabela 32 – Evaporações previstas para a albufeira de Pretarouca em fase de projeto (CENOR, 2007)

Mês	Coeficiente de tina	Evaporação Tina (mm)	Evaporação Albufeira (mm)	Percentagem (%)
outubro	0,7	91,1	63,8	6,49%
novembro	0,7	47,9	33,5	3,41%
dezembro	0,6	51,5	30,9	3,67%
janeiro	0,6	47,5	28,5	3,38%
fevereiro	0,6	70,3	42,2	5,01%
março	0,6	125	75	8,91%
abril	0,7	130,8	91,6	9,32%
maio	0,7	131	91,7	9,33%
junho	0,8	165,7	132,5	11,81%
julho	0,8	212,5	170	15,14%
agosto	0,8	186,6	149,3	13,29%
setembro	0,8	143,8	115	10,25%
Ano		1403,6	1024	100,00%

Comparando estes valores com os resultados obtidos com base no método referido na secção 4.4.6 para o cálculo das evaporações, pode constatar-se, desde logo, que os valores alcançados pelo método combinado de Penman representados na Tabela 29, são bastante superiores (cerca de 30%) aos valores estimados em projeto, especialmente nos meses referentes ao semestre seco, entre março e setembro (Figura 39).

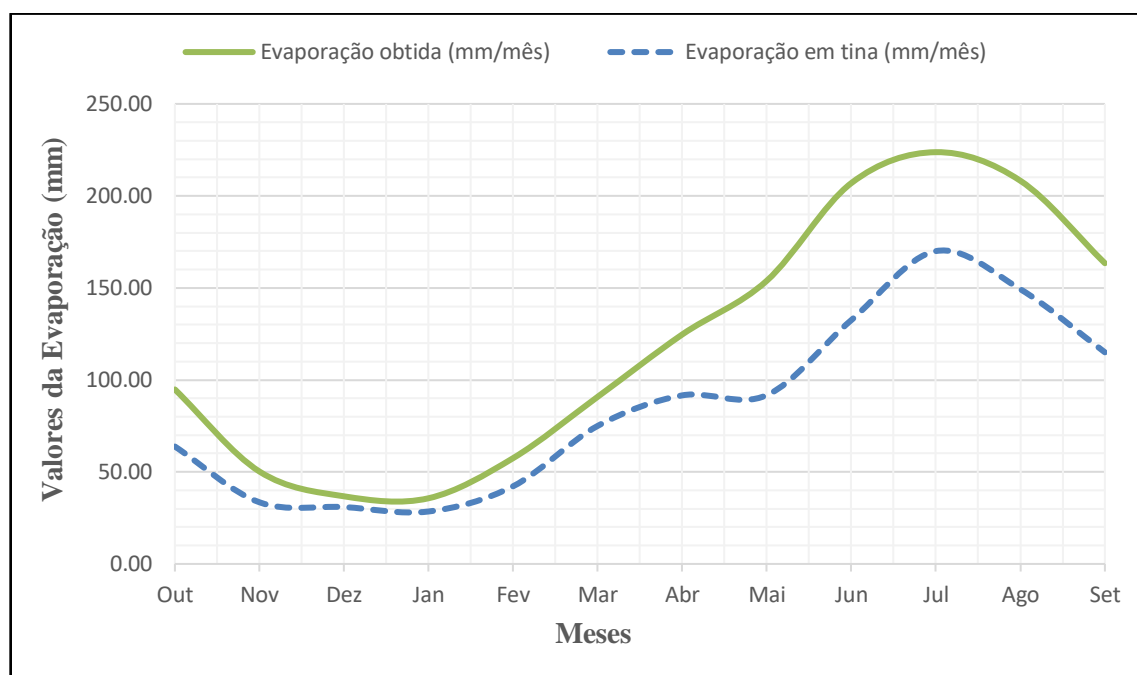


Figura 39 - Evaporações previstas em projeto e obtidas segundo o modelo combinado de Penman (mm/mês)

Salienta-se que os valores da evaporação obtidos pelo método combinado de Penman são apresentados com referências de características meteorológicas médias na região, descritas na secção 4.4.6. Nesse sentido, deve ter-se em conta que a integridade dos valores obtidos não é absoluta, mas relativamente idêntica.

À escala mensal, regista-se uma razoável diferença nos meses com elevadas temperaturas, entre os resultados estimados em projeto e os valores obtidos pelo método combinado de Penman, confirmando a tendência para uma ligeira subestimação dos valores da evaporação.

5.2.2.RESULTADOS RELATIVOS AO ABASTECIMENTO URBANO

Conforme referido na secção 4.4.3, o modelo previamente conjecturado ao sistema de abastecimento projetado abastecia parte da população dos concelhos de Lamego, Resende, Tarouca, Castro D'Aire e Vila Nova de Paiva. Devido à impossibilidade da empresa em abastecer os concelhos previstos em projeto, apenas Lamego, Resende e Tarouca foram e são abastecidas. Segundo a Tabela 13, estaria previsto em projeto abastecer 52 084 habitantes no ano hidrológico 2016/17. Contudo, nesse ano apenas 36 830 habitantes foram abastecidos pela albufeira de Pretarouca, correspondendo a 70% da população total prevista em projeto.

A Figura 40 exhibe a diferença verificada entre a quantidade de população que estaria planeada abastecer e a população que efetivamente foi abastecida, no período compreendido entre 2011/12 e 2016/17.

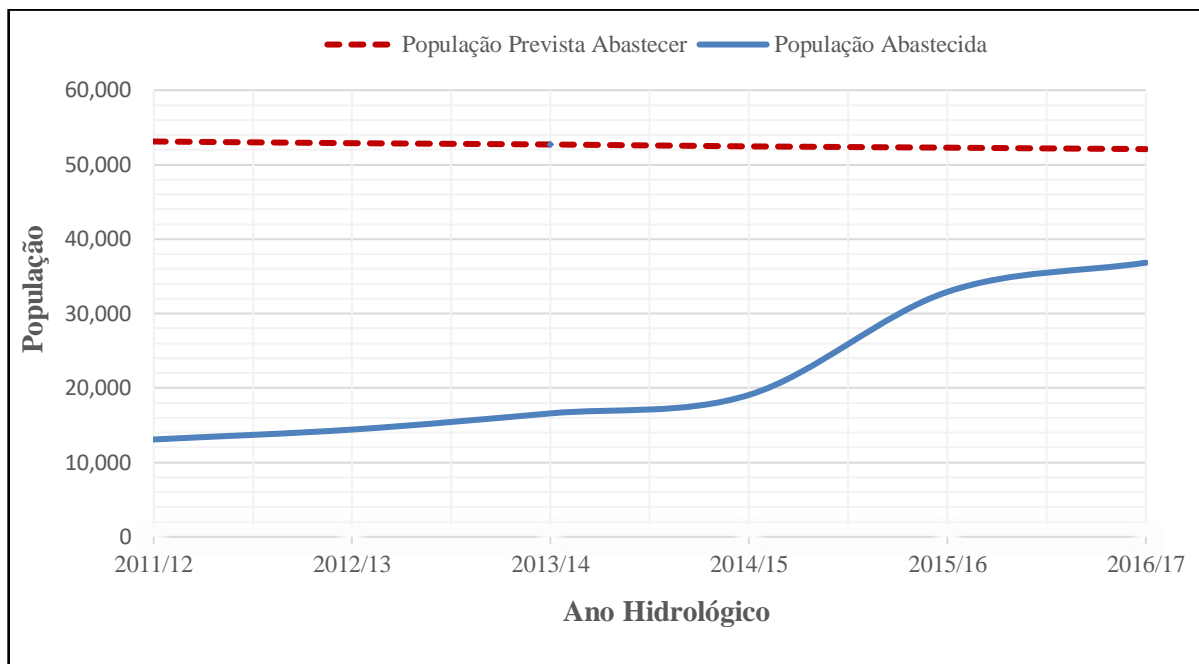


Figura 40 - Comparação entre a população que estaria prevista abastecer e a população abastecida

Na sequência da análise de resultados correspondentes para o mesmo período, verifica-se que ao longo dos anos, houve um aumento progressivo dos volumes de abastecimento urbano. Como se pode observar no gráfico da Figura 40, o crescimento não foi sensivelmente linear, devido ao aumento acentuado verificado entre o ano hidrológico 2014/15 e 2015/16.

5.2.3.RESULTADOS RELATIVOS AOS CAUDAIS ECOLÓGICOS

Numa fase de projeto, foi definido fixar o programa de descarga caudais ecológicos a garantir pela barragem de Pretarouca. Tiveram em consideração as características hidrológicas pertinentes da bacia dominada por esta barragem e nesse sentido, com base no que se esclareceu na DIA (Declaração de Impacte Ambiental), foram impostos dois programas de descarga de caudais ecológicos, um para anos húmidos ou médios, outro para anos secos de acordo com o referido previamente descrito na secção 4.4.4, com base nos registos da precipitação para a série histórica de 30 anos. De forma a realizar a comparação entre os valores pré-estabelecidos em projeto pelos programas de descarga de caudal ecológico e os valores obtidos pelas leituras dos circuitos de caudais ecológicos, é representado na Figura 42, um gráfico esquemático que retrata esta comparação.

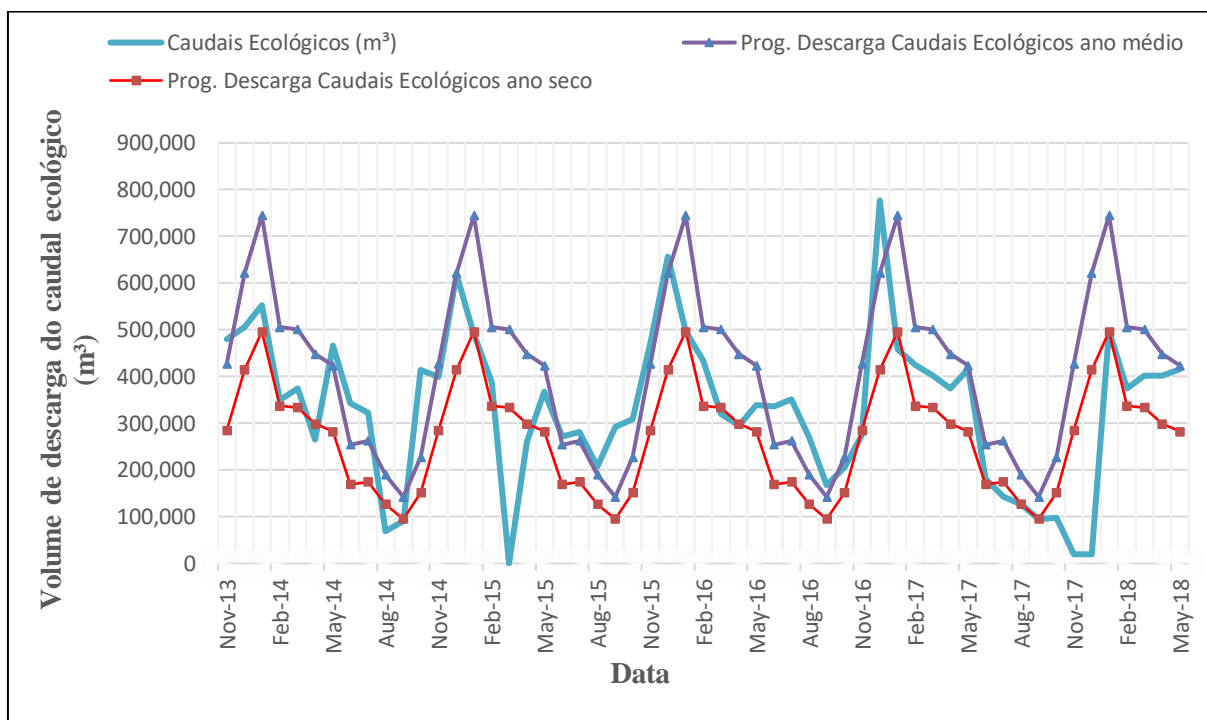


Figura 41 - Volumes descarregados pelos sistemas de descarga de caudal ecológico, a partir de 01/10/2013

Conforme se pode observar na Figura 41, a exploração real da albufeira, com base nos valores retirados da Tabela 20, seguiu rigorosamente os conjuntos de regras pré-estabelecidas, uma vez que os volumes descarregados pelos dois circuitos de descarga de caudal ecológico são semelhantes aos volumes mínimos pertencentes aos programas de descarga de caudal ecológico, excetuado os casos observados em março de 2015 e em finais do 2017. A primeira situação deveu-se, a um ato de vandalismo que consistiu no deslocamento da boia localizada na escada aquática que contabiliza os níveis de água, constatando então a ausência das leituras por parte do sistema de “By-Pass”. No segundo caso, relativo a outubro, novembro e dezembro de 2017, derivou de uma alteração acordada com a APA, de forma a estabelecer uma diminuição provisória dos caudais ecológicos mínimos, devido às baixas afluências observadas durante o ano hidrológico 2016/17 e início do ano hidrológico 2017/18.

Da avaliação mensal deste parâmetro, verificam-se “esforços” em cumprir os programas mínimos da albufeira nos períodos de estiagem – julho, agosto, setembro – face aos baixos volumes afluentes que se demonstraram muito inferiores às que estavam previstas em projeto. Efetivamente, os resultados obtidos pela descarga de caudal ecológico revelam que, após o longo período de estiagem verificado no ano hidrológico 2016/17, estes são significativamente superiores aos volumes afluentes à albufeira. Considerando o período de estiagem mais prolongado no estudo observado – julho, agosto, setembro, outubro e novembro de 2017 – verificou-se um volume afluente total de 261 085 m³ (Tabela 31). Segundo o programa de caudais mínimos de um ano seco, para estes meses, o volume exigido para descarga de caudal ecológico é correspondente a 833 710 m³. Factualmente, denota-se uma diferença excessiva em longos períodos de estiagem.

5.2.4. ANÁLISE DAS AFLUÊNCIAS

5.2.4.1. Resultados prévios

Nesta secção apresentam-se e comparam-se os resultados relativos às afluências previstas em projeto e obtidas pelas várias metodologias descritas ao longo do trabalho, para os vários períodos de análise. O processo de análise das previsões de projeto foi realizado para o período de 30 anos, compreendido entre 01/10/1963 e 01/10/1995, excetuando os anos de 1973/74 e 1974/75 (Figura 42). O estudo baseou-se na avaliação da consistência e da qualidade das previsões de escoamentos superficiais com base na fórmula calibrada de Turc e precipitações ponderadas nesse período para a bacia de Pretarouca, conforme descrito na secção 4.2.

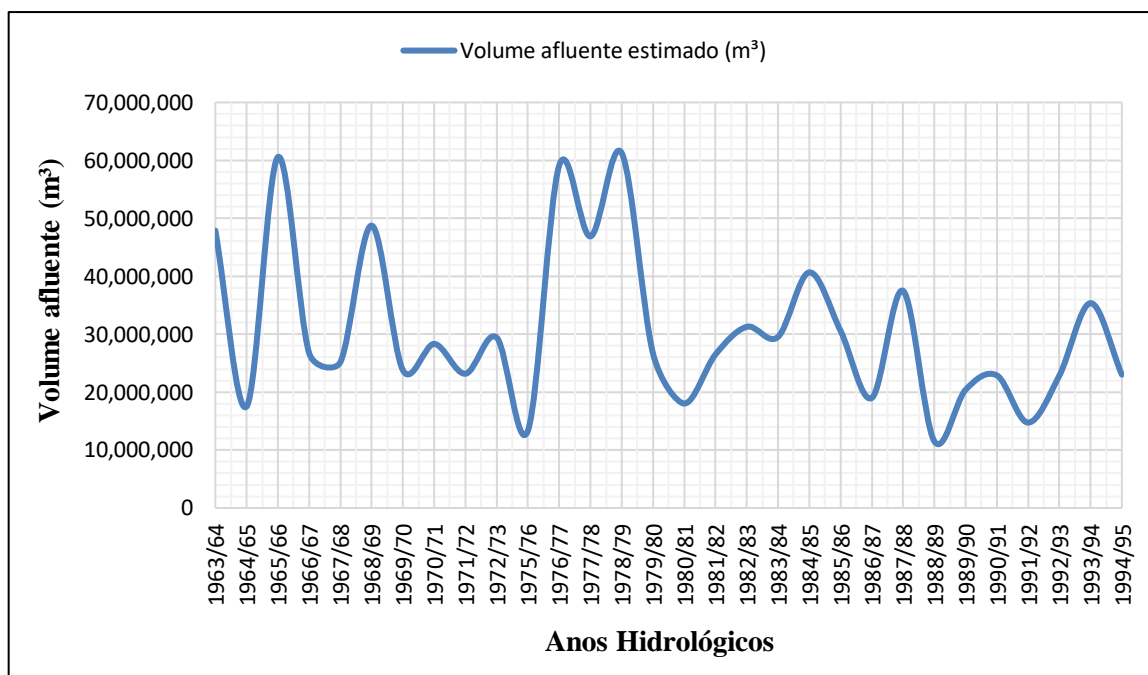


Figura 42 – Escoamentos anuais afluentes à albufeira estimados em projeto (m³) para o período de 30 anos (CENOR, 2007)

Analisando a Figura 42, verificam-se diferenças significativas e até repentinas ao longo dos anos. Dos períodos em análise é facilmente apurado que o ano hidrológico de 1978/79 apresenta o volume afluente mais elevado, e contrariamente, o ano hidrológico de 1988/89 revela volumes acentuadamente reduzidos. Conforme referido na secção 4.2.2, constatou-se que após a avaliação dos escoamentos afluentes à bacia de Pretarouca, o ano hidrológico de 1985/86 apresentava valores de escoamento anual afluentes idênticos à média calculada para o período de 30 anos analisado.

Ressalva-se que os anos hidrológicos de 1978/79 e 1988/89 ostentam os valores extremos máximos e mínimos, respetivamente, em todos os meses, para o período de 30 anos analisado (Tabela 33). Por este motivo, é fundamental ter em atenção os valores do escoamento afluente mensal para posterior confrontação com os valores observados pela albufeira, no período em que a mesma se encontra em exploração. Na Figura 43, é possível observar a diferença entre o escoamento afluente estimado no ano mais húmido (1978/79), mais seco (1988/89) e os valores do escoamento médio para o período de 30 anos.

Tabela 33 - Afluências mensais estimadas para os anos hidrológicos de 1978/79 e 1988/89

Meses	1978/79	1988/89
	(Ano mais húmido)	(Ano mais seco)
out	1 137 440 m ³	213 803 m ³
nov	3 360 143 m ³	631 601 m ³
dez	8 696 719 m ³	1 634 708 m ³
jan	11 146 910 m ³	2 095 266 m ³
fev	16 036 858 m ³	3 014 422 m ³
mar	6 870 554 m ³	1 291 447 m ³
abr	5 810 335 m ³	1 092 159 m ³
mai	4 789 770 m ³	900 325 m ³
jun	2 078 697 m ³	390 729 m ³
jul	669 942 m ³	125 928 m ³
ago	377 755 m ³	71 006 m ³
set	283 838 m ³	53 353 m ³

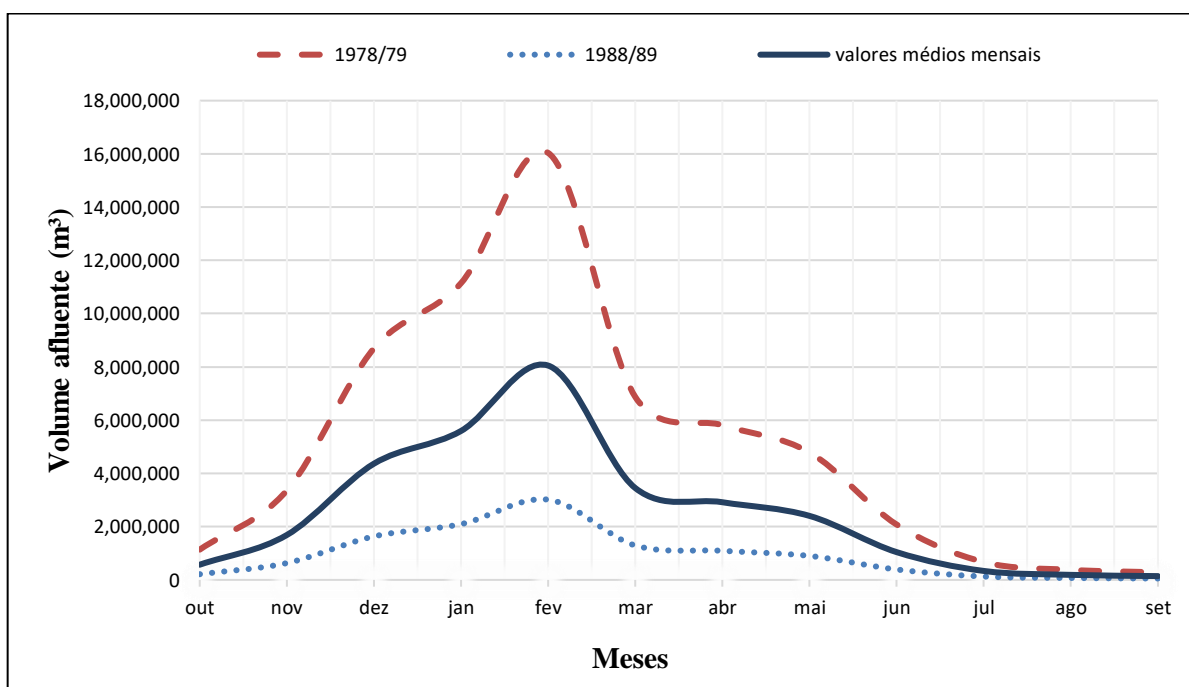


Figura 43 – Gama de variação dos volumes anuais afluentes à barragem de Pretarouca no período compreendido entre 1963/64 e 1994/95.

De acordo com o representado na Figura 43, é possível constatar os baixos valores de afluências verificadas no semestre mais seco e, comparativamente, elevados valores de afluências no semestre húmido. Os valores de afluências mensais apresentados na Tabela 33 foram definidos como intervalos de limitação dos escoamentos afluentes à albufeira de Pretarouca. Isto significa que a verificação do

dimensionamento da albufeira foi efetuada com base nas características hidrológicas extremas da sub-bacia de Pretarouca.

5.2.4.2. Resultados obtidos

Atendendo à análise dos resultados da aplicação das metodologias apresentadas ao longo deste trabalho, às curvas de áreas inundadas e volumes armazenados, e aos níveis horários da albufeira é efetuado o balanço hídrico final na albufeira de Pretarouca. Nas Figuras 44 e 45 representam-se, respetivamente, os resultados dos níveis mínimos mensais da cota da albufeira e volumes mínimos armazenados mensais.

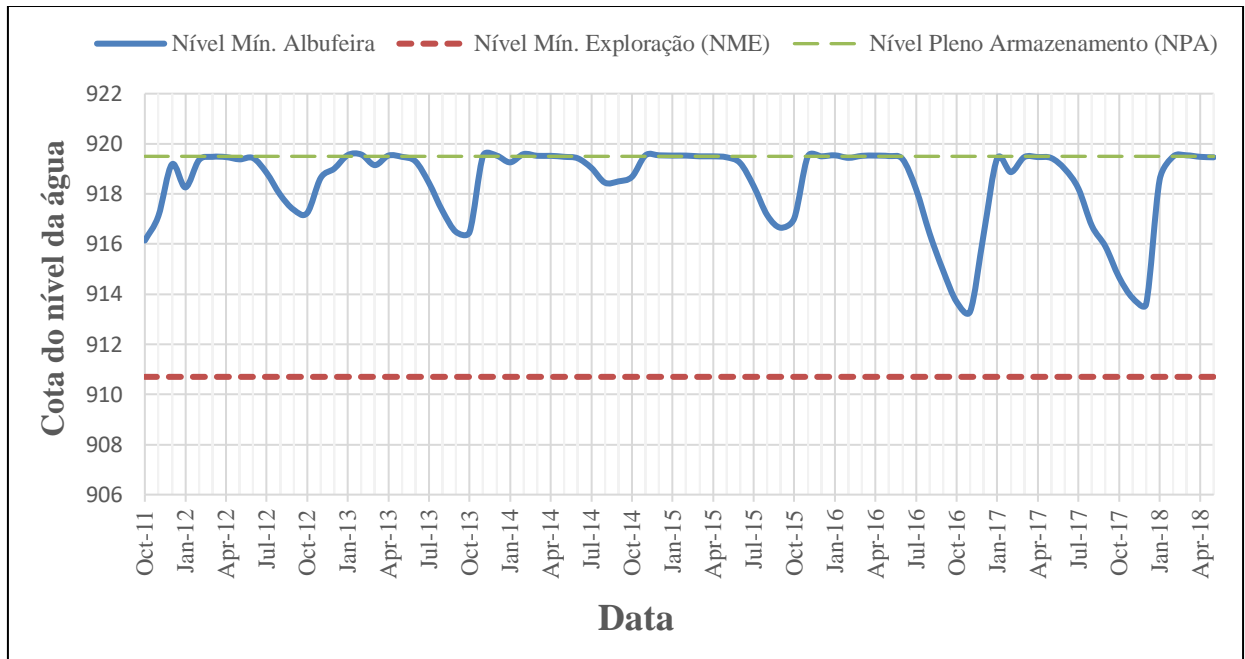


Figura 44 - Nível da água para a albufeira de Pretarouca no período de 01/10/2011 a 01/06/2018

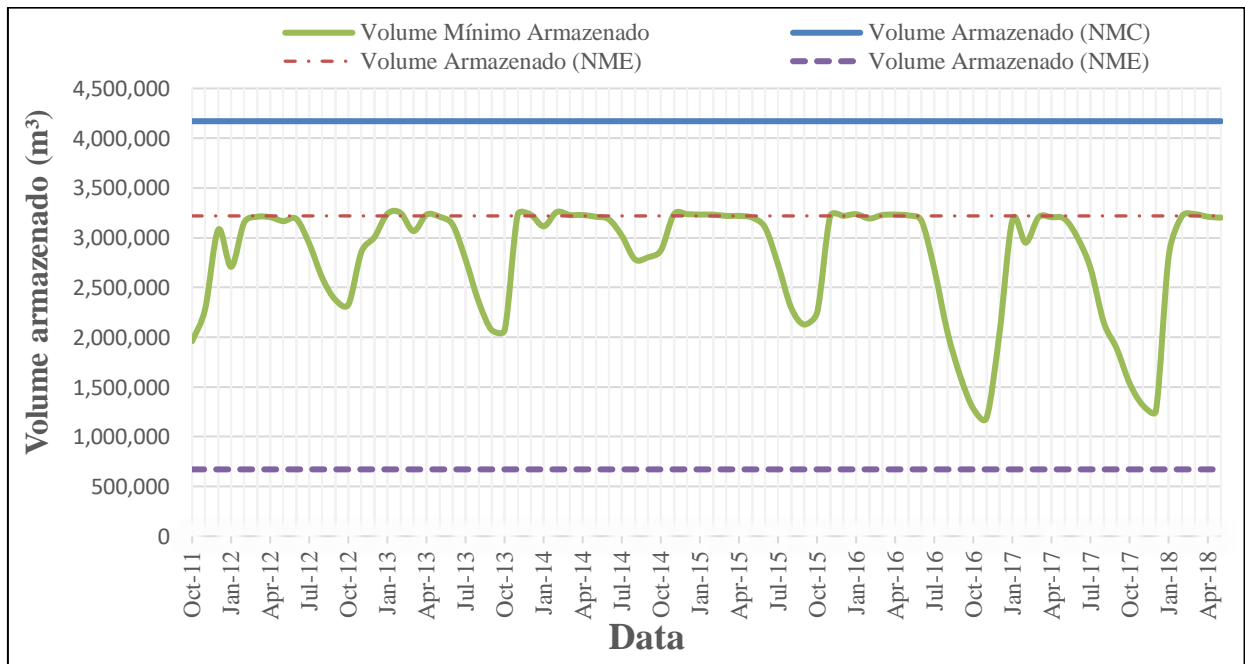


Figura 45 - Volume armazenado na albufeira de Pretarouca no período de 01/10/2011 a 01/06/2018

Analisando a Figura 44 e a Figura 45 pode ser inferido que, em consequência dos efeitos da seca mais prolongada observada – início de novembro de 2016 – o nível mais baixo que a albufeira atingiu foi à cota 913,31, com um volume de armazenamento correspondente de 1 188 335,91 m³.

Posto isto, de forma a ilustrar os resultados obtidos pelos procedimentos desenvolvidos, apresentam-se na Figura 46, os resultados da comparação realizada entre os volumes afluentes calculados pelo método da simulação do balanço hídrico no período compreendido entre 01/10/2011 a 01/06/2018, representados na Tabela 31, e os máximos e mínimos afluentes previstos em projeto, considerando todas as variáveis decisivas.

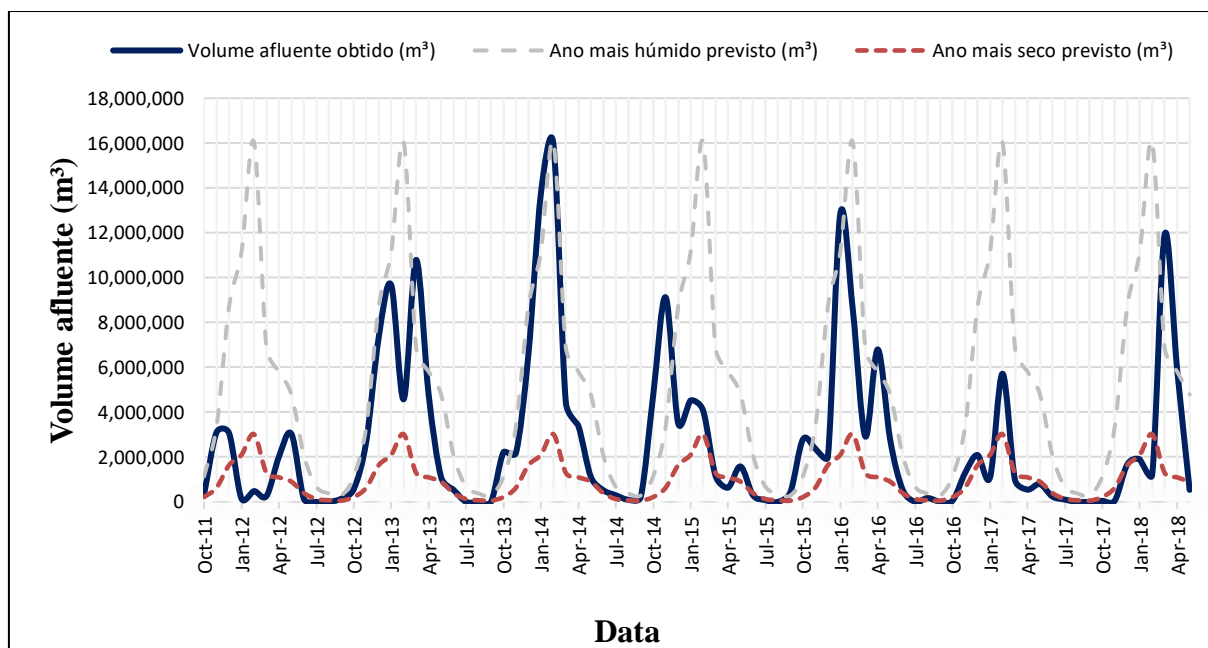


Figura 46 - Comparação entre as previsões de volumes mensais afluentes máximos e mínimos ocorridos num período histórico de 30 anos, com os volumes afluentes calculados (observados) para o período compreendido entre 01/10/2011 e 01/06/2018

Analisando a Figura 46, pode ser inferido que é facilmente perceptível a verificação de períodos, em que ocorreram picos de excesso – caso do ano hidrológico de 2013/14 – mas que por sua vez, a totalidade do volume afluente não ultrapassa o total anual no ano mais húmido (1978/79). Contrariamente, o caso do ano hidrológico de 2016/17 – nos meses de outubro, janeiro, março, abril, maio, junho, julho, agosto e setembro – apresenta valores mensais inferiores aos resultados mensais apresentados pelo ano mais seco previsto.

A Tabela 34 apresenta, para cada um dos anos hidrológicos analisados, os volumes totais afluentes mensalmente à barragem de Pretarouca. Nesta tabela, os resultados a vermelho, em conformidade com os valores previstos observados na Tabela 33, indicam um valor inferior ao mínimo previsto mensal. Do mesmo modo, os resultados a verde apontam um valor superior ao máximo volume mensal afluente previsto no período de 30 anos.

Tabela 34 - Resultados do processo comparativo entre os volumes afluentes previstos em projeto e os volumes afluentes calculados no período compreendido entre 01/10/2011 e 01/06/2018

Meses	Volume afluente à albufeira de Pretarouca(m³)							Total	% mensal no período
	2011/12	2012/13	2013/14	2014/15	2015/16	2016/17	2017/18		
out	335 099	565 606	2 212 880	4 747 603	2 785 545	57 592	43 081	10 747 407	5,03%
nov	3 100 734	2 688 448	2 180 189	9 118 031	2 374 243	1 286 038	54 123	20 801 805	9,74%
dez	3 068 254	7 335 753	6 595 136	3 506 077	2 004 254	2 087 132	1 663 046	26 259 653	12,30%
jan	140 978	9 664 027	13 756 697	4 521 204	12 857 604	1 086 305	1 901 060	43 927 875	20,57%
fev	479 792	4 574 910	15 948 125	4 076 240	8 569 661	5 713 938	1 216 708	40 579 375	19,01%
mar	256 933	10 791 186	4 426 241	1 154 510	2 916 970	978 935	11 925 571	32 450 345	15,20%
abr	2 011 858	4 783 106	3 390 429	635 583	6 798 171	545 611	5 901 415	24 066 174	11,27%
mai	3 027 551	1 098 568	1 115 962	1 576 770	2 753 077	790 207	533 979	10 896 113	5,10%
jun	139 185	534 964	521 542	295 158	531 920	236 688		2 259 458	1,06%
jul	0	0	296 048	78 438	0	100 492		474 978	0,22%
ago	0	0	93 982	0	168 219	0		262 201	0,12%
set	139 865	0	211 125	437 331	0	0		788 321	0,37%
Total ano hidrológico	12 700 250	42 036 570	50 748 355	30 146 945	41 759 665	12 882 936	23 238 982	213 513 704	100,00%
% anual no período	5,95%	19,69%	23,77%	14,12%	19,56%	6,03%	10,88%	100,00%	

Examinados os resultados apresentados na Tabela 34, sublinha-se em primeiro lugar que, conforme referido nas secções de caudal ecológico, para os seis anos hidrológicos analisados, os anos de 2011/12 e 2012/13 não contabilizam os valores respeitantes ao caudal ecológico - devido à impossibilidade de leitura das bombas – nem os resultados do Sistema de By-Pass no caso do ano hidrológico de 2011/12. Contudo, é perceptível entender a gravidade da situação concreta do ano hidrológico de 2016/17, em que apresenta nove dos doze meses com valores inferiores aos correspondentes volumes mínimos mensais analisados para o período histórico de 30 anos, contabilizando apenas 12.8 milhões de m³ anuais.

5.3. DESEMPENHO DA ALBUFEIRA FACE A 2 ANOS COM AFLUÊNCIAS SEMELHANTES AO ANO MAIS SECO

Face aos resultados expostos na Tabela 34 torna-se claro que o ano hidrológico 2016/17 apresentou sinais evidentes de seca prolongada, atingindo valores de escoamento afluentes de tal forma reduzidos que poderiam possibilitar o incumprimento da prioridade de abastecimento na albufeira de Pretarouca. Com o objetivo de analisar um eventual cenário mais crítico na albufeira, este subcapítulo aborda a formulação de um evento de seca que consiste na observação do desempenho da albufeira face a 2 anos consecutivos com volumes afluentes equivalentes ao ano hidrológico de 2016/17 (ano mais seco observado), visto tratar-se de um ano extremamente crítico do ponto de vista hidrológico.

Para o caso apresentado é analisada uma primeira observação que inclui os volumes de abastecimento correspondentes à população abastecida em 2017 (70%) (descrita em 4.4.3), e uma segunda análise que compreende os volumes de abastecimento urbano previstos em projeto em 2017 (100%). Neste contexto, para a realização das análises focadas no comportamento da albufeira, são impostas as seguintes condicionantes prioritárias:

- O volume armazenado (V_{arm}) no instante inicial, corresponde ao valor resultante do nível da água em pleno armazenamento, à cota 919,5. Isto significa que a albufeira, em primeira instância começa cheia, equivalente a um volume armazenado de 3 219 041 m³;
- Sempre que as afluências à albufeira conduzem a que seja ultrapassado o volume correspondente ao nível de pleno armazenamento (3 219 041 m³), o volume sobranete é descarregado pelo descarregador de cheias, e o nível da água permanece constante no NPA (919,5).
- Os caudais ecológicos assumem os valores mínimos obrigatórios referentes a um ano seco (descrito em 4.4.4), mas a distribuição para cada um dos dois sistemas disponíveis (Sistema de descarga de caudal ecológico e Sistema de “By-Pass”), assume a correspondente descarga em percentagens de utilização idênticas às ocorridas em 2016/17 (Figura 47).

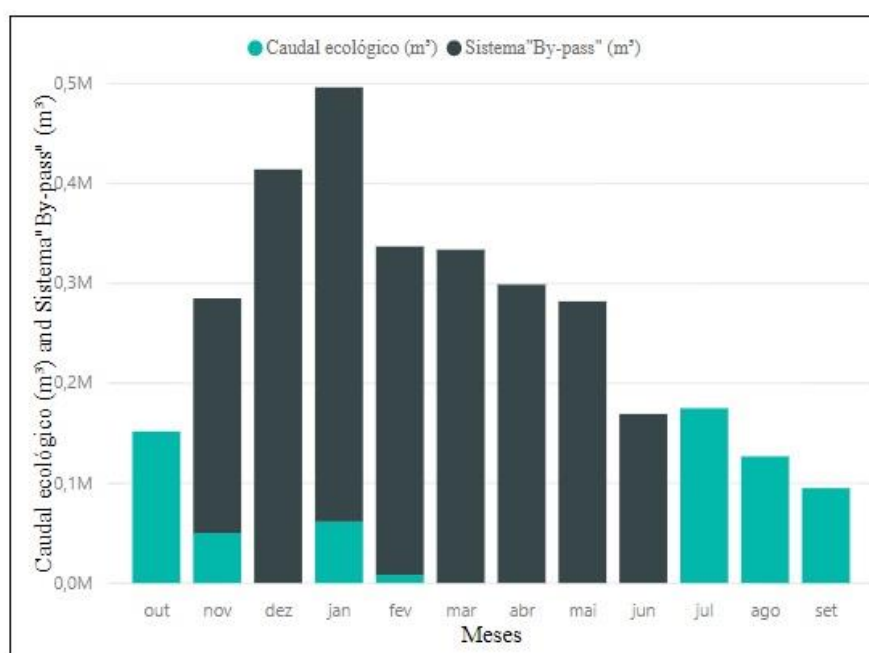


Figura 47 - Aplicação dos sistemas de caudais ecológicos

- A utilização da descarga de fundo segue um valor médio de todas as descargas realizadas no período de observação, correspondendo a um volume de descarga de 590 000 m³. No caso em estudo, a execução da descarga de fundo foi regularmente efetuada no primeiro semestre do ano hidrológico, para realização de testes de operacionalidade periódicas. No âmbito da simulação efetuada, a descarga de fundo é concretizada no mês de fevereiro por se tratar do mês em que se observou maior volume descarregado pela descarga de fundo.
- Os volumes infiltrados, e posteriormente bombados são idênticos aos valores anuais observados no período em exploração, correspondendo a um volume anual de 7 068,41 m³;

- A determinação da evaporação – que acompanha o procedimento descrito em 4.4.6 – é estimada em função da área inundada (m^2), que por sua vez, é dependente do nível da cota da água no início do mês a que a albufeira se encontra.

A avaliação do desempenho da albufeira é realizada, tal como referido anteriormente, através da consideração de variação temporal dos volumes captados para abastecimento urbano. Optou-se pelo estudo comportamental da albufeira, numa primeira análise, através da captação real existente, ou seja, apenas 70% da população prevista a abastecer correspondente a 36830 habitantes. Segue por isso igual distribuição verificada à já antes considerada neste trabalho (Tabela 15) para o ano hidrológico de 2016/17 (Figura 48).

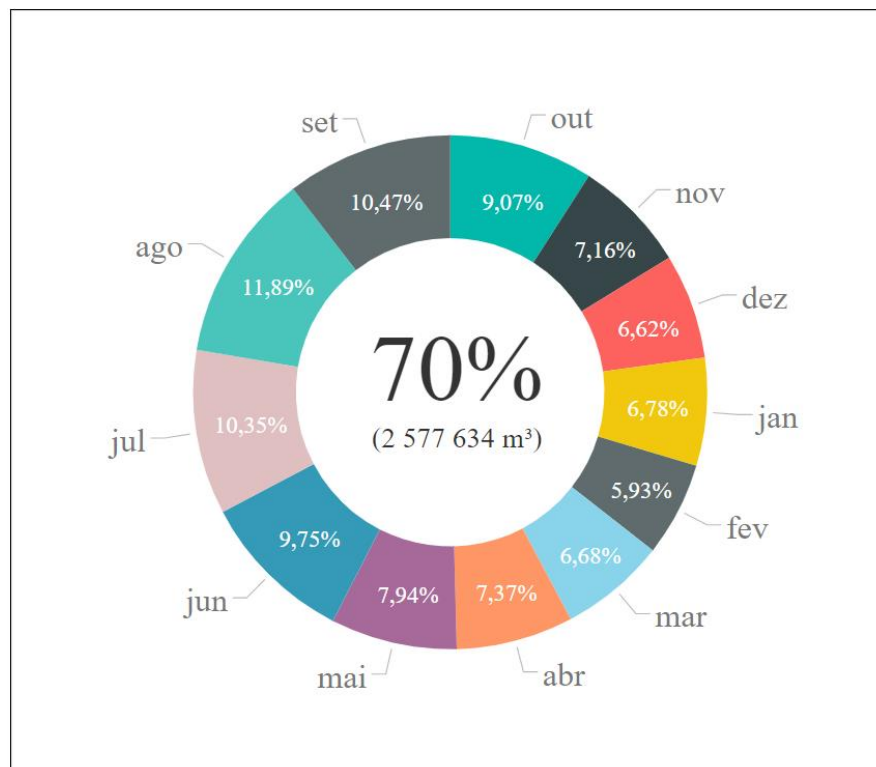


Figura 48 - Distribuição mensal dos volumes captados por ano, para o abastecimento de 70% da população

Realizado o balanço hídrico apresentado na Tabela 39 (anexo D) referente à simulação deste evento, e conforme os limiares impostos acima descritos, foi observado o desempenho da albufeira. É importante examinar as variações do nível da cota da água na albufeira no início de cada mês face às diferentes utilizações mensais (Figura 49) e os volumes armazenados mensais que variam consoante os níveis da albufeira (Figura 50).

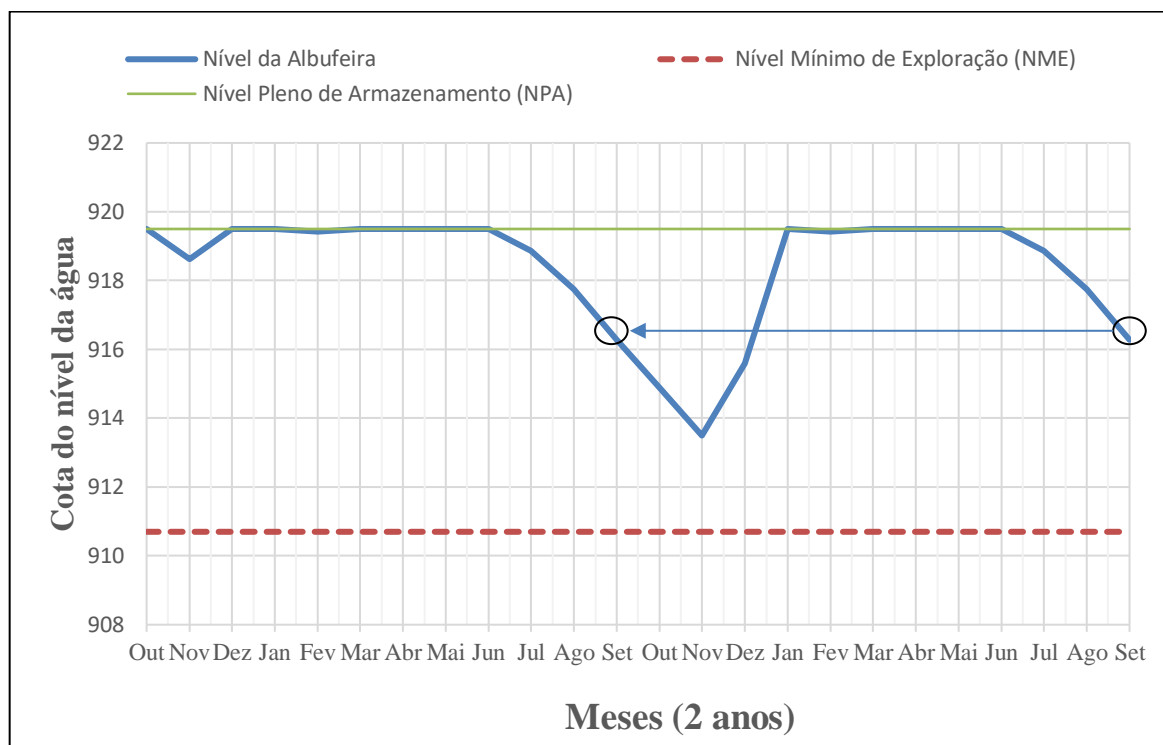


Figura 49 - Nível da cota da água na albufeira de Pretarouca para um período de 2 anos com afluências de 2016/17 e abastecimento a 70%

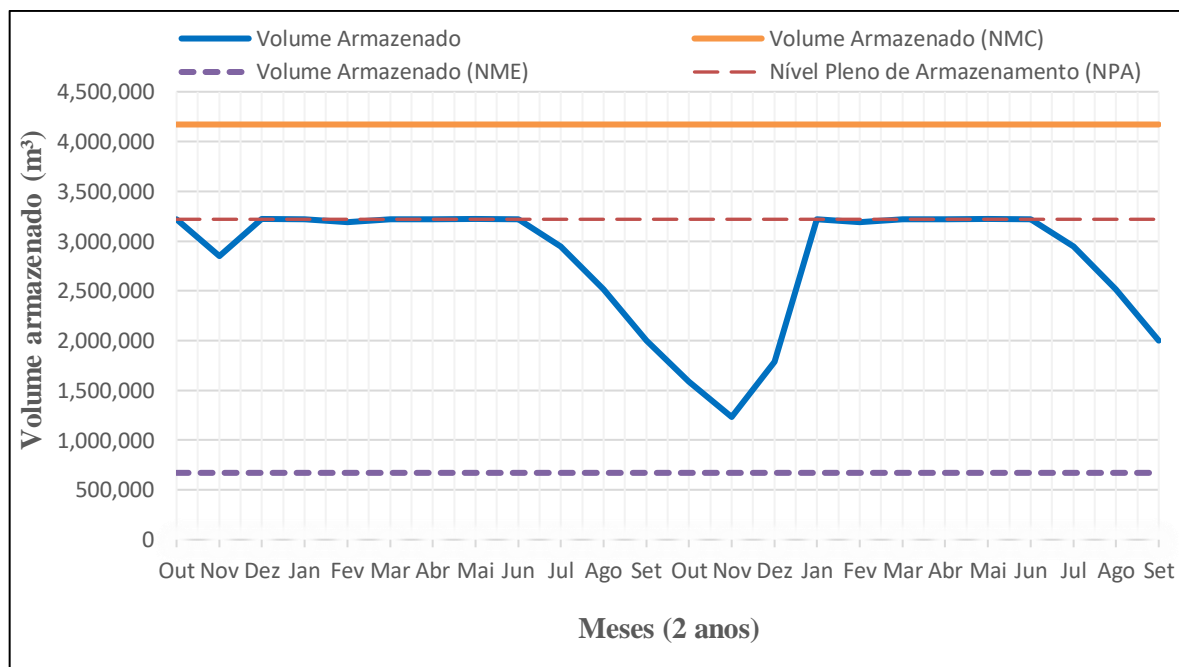


Figura 50 - Volume armazenado na albufeira de Pretarouca para um período de 2 anos com afluências de 2016/17 e abastecimento a 70%

Desta caracterização poder-se-á afirmar que, as regras de operação prioritárias (caudais mínimos ecológicos e volumes captados para abastecimento urbano) são cumpridas. Como se pode observar nas

Figuras 49 e 50 os níveis da água no início de setembro são iguais (916,27) e os níveis mínimos de exploração não são atingidos, destacando que o nível mínimo da cota observado foi de 913,5 no mês de novembro. É de realçar que foram utilizados caudais ecológicos mínimos que cumprem o programa de caudais ecológicos mínimos para um ano seco, apresentados na Tabela 17.

Após esta análise inicial, é apresentada uma caracterização mais crítica que engloba o volume de captação para abastecimento urbano que seria previsto abastecer toda a população dos 5 concelhos analisados. Decidiu seguir-se uma distribuição percentual mensal idêntica à observada no ano 2016/17 (Figura 51)

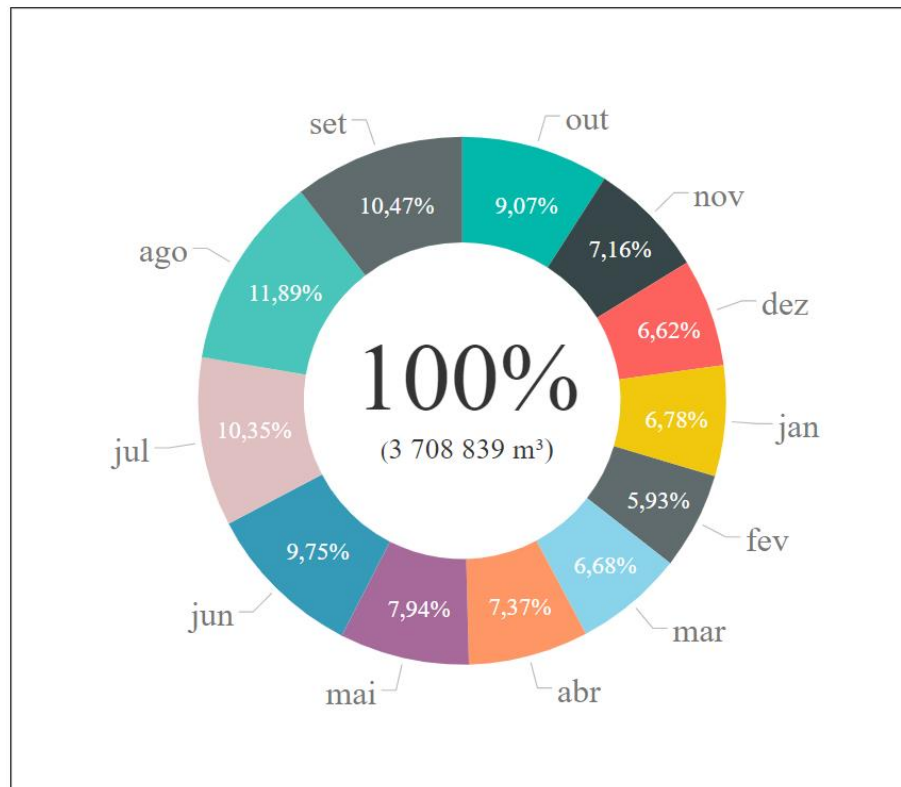


Figura 51 - Distribuição mensal dos volumes captados por ano, para um abastecimento de 100% da população

Conforme indicado acima, é examinada a análise ao comportamento da albufeira face à alteração do volume captado destinado ao abastecimento urbano. Tal consideração deveu-se ao facto de ter sido constatado que a variação deste parâmetro tem uma influência acrescida nos resultados de simulações realizadas para avaliar a sensibilidade da albufeira dadas as alterações neste parâmetro (Figura 52 e 53). O balanço hídrico referente a este evento é apresentado na Tabela 40 no Anexo D.

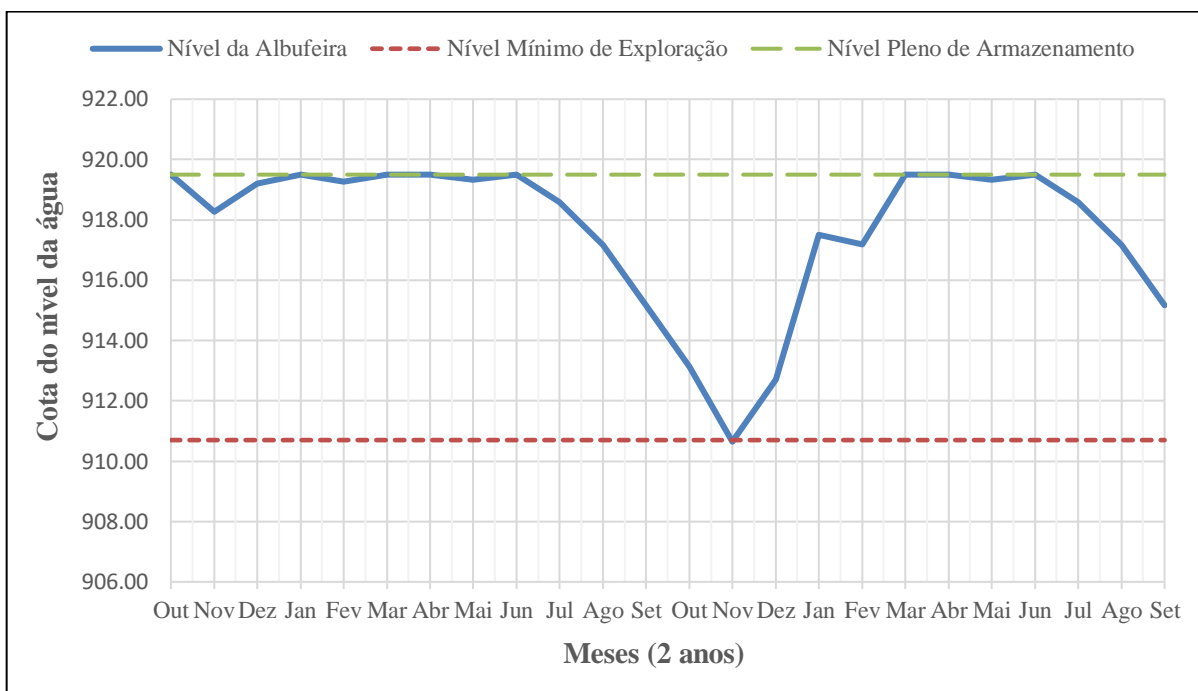


Figura 52 - Nível da cota da água na albufeira de Pretarouca para um período de 2 anos com afluências de 2016/17 e abastecimento a 100%

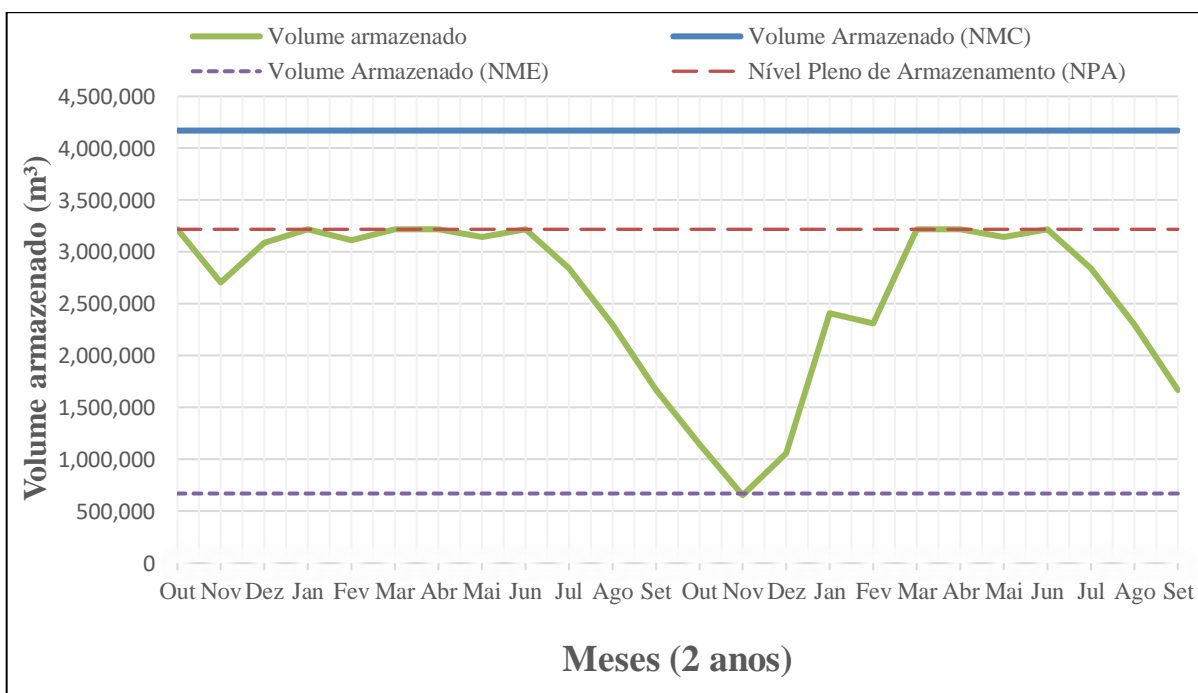


Figura 53 - Volume armazenado na albufeira de Pretarouca para um período de 2 anos com afluências de 2016/17 e abastecimento a 100%

No seguimento do exposto, é verificável que ocorrerá uma falha no sistema de abastecimento no caso de ocorrer a situação simulada. Os resultados revelam que os níveis da água no início de setembro são iguais (915,10) e o nível mínimo de exploração é atingido no final do mês de outubro, com o nível de

água a alcançar a cota de 910,67, ultrapassando assim o nível mínimo previsto (910,7). A simulação permite concluir que a albufeira chegaria a um cenário e situação gravosos, obrigando a restrições efetivas de utilização de água da albufeira, e à adoção de medidas de prevenção e uso eficiente da água.

5.4. ANÁLISE DE EVENTUAL SOLUÇÃO A ADOTAR EM FUNÇÃO DOS RESULTADOS DO MODELO

Conforme verificado no evento descrito em 5.3.2, referente ao abastecimento urbano de 100%, o nível da água atinge o nível mínimo de exploração (NME), ocorrendo assim uma situação de falha no abastecimento de água à população.

Mau grado a complexidade do problema, uma eventual solução poderá consistir em adotar uma ligeira subida do coroamento da barragem (alvo de estudo por parte da empresa Águas do Norte), que pode ser adotada no descarregador de cheias ou por intermédio da instalação de comportas. Tal permite aumentar a capacidade de armazenamento da albufeira possibilitando o armazenamento de maiores volumes de água durante períodos de precipitação mais elevados de modo a fazer face às necessidades nos períodos de seca. Para além de aumentar a reserva de água disponível para abastecimento e rega, tal também possibilita o aumento da reserva de água para combate a incêndios.

É uma solução mais vantajosa do que a construção de novas barragens, na medida em que a implementação das mesmas se torna um processo moroso e com custos ambientais elevados.

Contudo, é essencial garantir a segurança das estruturas hidráulicas, relativamente a solicitações e ações que se instalam progressivamente durante e após o processo construtivo, tais como as pressões hidrostáticas, peso próprio e todas as forças adicionais incidentes que alteram face a um alteamento do coroamento. É necessário ter desde logo total conhecimento do modo de funcionamento da barragem, bem como a sua interação com o maciço de fundação, pois o acréscimo à estrutura já existente conduzirá a uma distribuição de esforços no corpo da barragem inicial, provocando um novo estado de tensão no maciço de fundação (Silva, 2009).

Ressalvando eventuais limitações estruturais face a um aumento do coroamento da barragem, procedeu-se à simulação de um evento idêntico ao descrito em 5.3.2 para o abastecimento urbano de 100% previsto em projeto, considerando o alteamento do coroamento em, exemplificativamente 0,5 metros, considerando, assim, o nível de pleno armazenado (NPA) à cota 920,0. Também poderia ser abordada a hipótese da colocação de comportas no descarregador de cheias visto existir uma folga até ao pavimento rodoviário à cota 922,0.

Na Figura 54 e na Figura 55 apresentam-se os resultados simulados da variação do nível da albufeira e o volume armazenado na mesma, para o período de 2 anos com os valores afluentes ao ano hidrológico de 2016/17. O balanço hídrico referente a este evento apresenta-se na Tabela 41 no Anexo D.

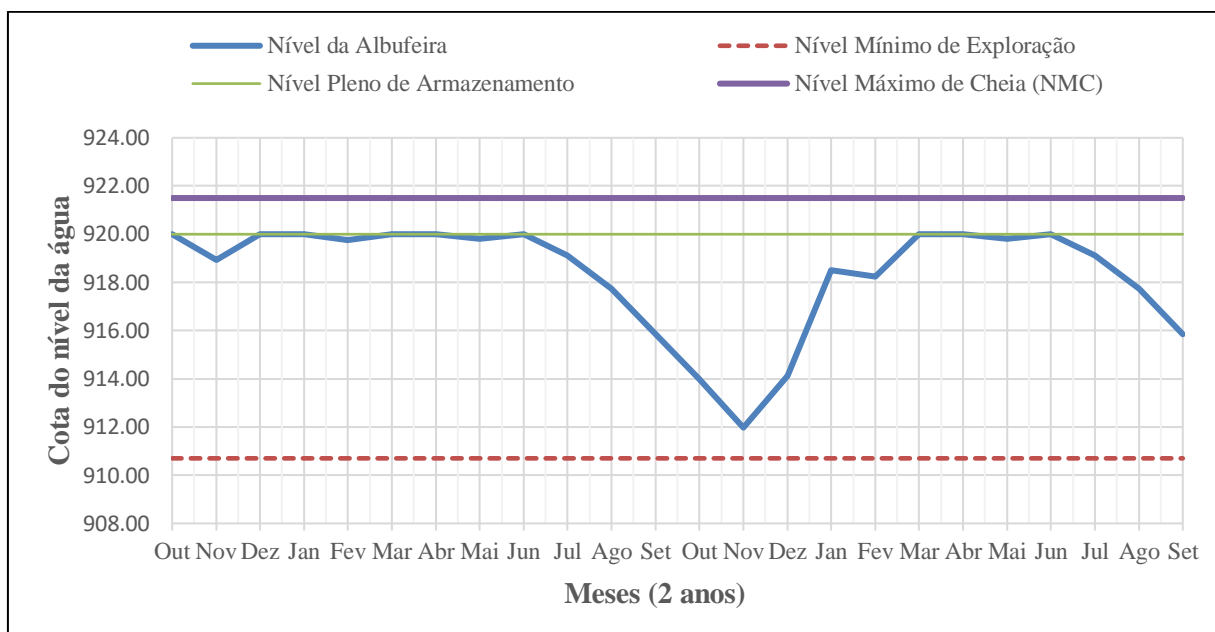


Figura 54 - Nível da cota da água na albufeira de Pretarouca para um período de 2 anos com afluências de 2016/17, abastecimento a 100% e NPA à cota 920,0.

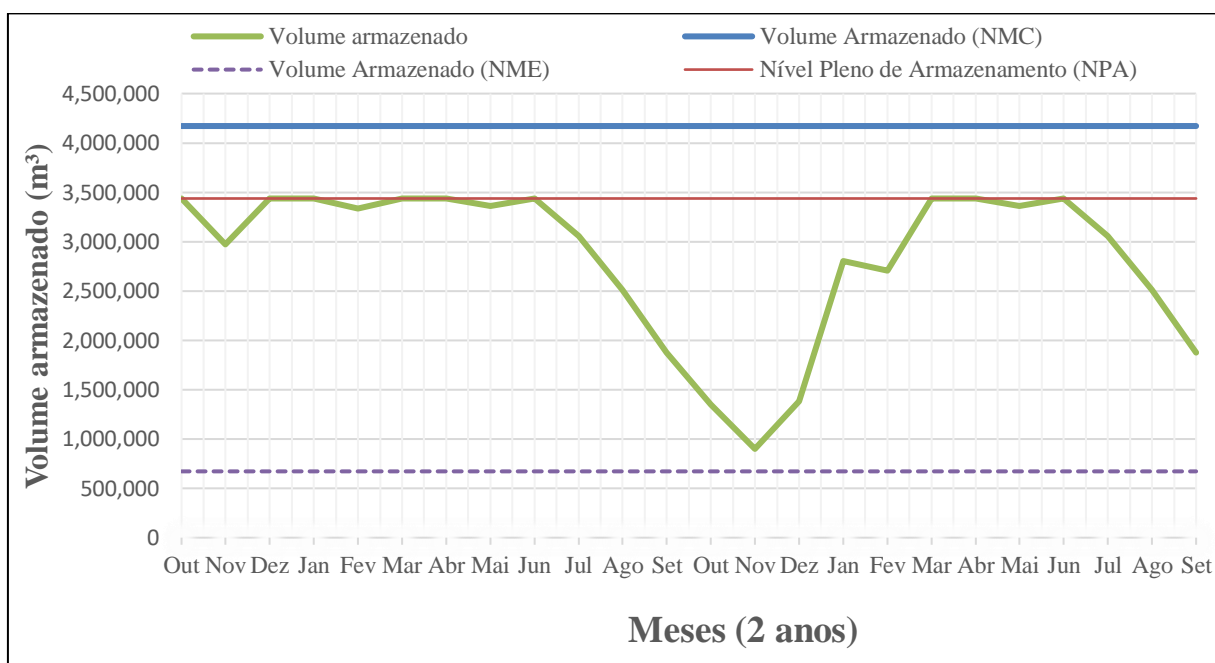


Figura 55 - Volume armazenado na albufeira de Pretarouca para um período de 2 anos com afluências de 2016/17, abastecimento a 100% e NPA à cota 920,0.

Assim, e comparando com os valores apresentados nas Figuras 52 e 53, correspondentes ao evento hidrológico com as mesmas características, observa-se que, os níveis da água no início de setembro são iguais (915,79) e com um ligeiro aumento do nível de pleno armazenamento em 0,5 metros, registou-se

um nível mínimo de água à cota 911,80, representando uma diferença de 1,10 metros acima do nível mínimo de exploração (NME).

É importante realçar que no espaço temporal do evento simulado, e devido à maior capacidade de encaixe com o alteamento do coroamento da barragem, se verificou uma diminuição do caudal descarregado pelo descarregador de cheias, tal como seria de esperar.

Atenta as conclusões inferidas através da análise dos resultados de cada um dos eventos simulados, pode concluir-se que a subida do coroamento da barragem pode ser uma solução credível a encarar, conduzindo ao aumento da capacidade de armazenamento da albufeira.

5.5.SISTEMA DE PREVISÃO E ALERTA DE RECURSOS HÍDRICOS

O estudo de situações extremas é alvo de elevada importância para a garantia de quaisquer necessidades de uso do volume armazenado numa albufeira. A gestão e prevenção de situações de seca têm um papel importante na previsão de potenciais impactos resultantes (Vivas e Maia, 2008). O objetivo deste subcapítulo é apoiar o controlo dos níveis da albufeira de Pretarouca, com o intuito de prevenir o perigo de stress no abastecimento urbano e às comunidades ictiológicas.

Considerando os volumes afluentes antes referidos, referentes ao período de 2011/12 a 2017/18 para a bacia hidrográfica de Pretarouca, e as características do aproveitamento indicadas, bem como as estimativas de necessidades das utilizações alocadas à albufeira, é possível verificar os resultados observados dos níveis da mesma, tal como os seus volumes armazenados no final de cada mês, representadas nas Figuras 44 e 45. De facto, esta observação corresponde a um período de tempo durante o qual a albufeira evidenciou um comportamento e utilizações adequadas. Ainda assim, é perceptível que face aos valores crescentes dos volumes captados ao longo dos anos, verificaram-se baixos níveis de água na albufeira, sem que nunca tenha ocorrido esgotamento das reservas.

Contudo, é evidente que, durante o período de observação houve um maior número de ocorrências de situações críticas de seca. O prolongamento de situações de seca poderá trazer graves consequências, colocando em causa a garantia do abastecimento urbano.

Este subcapítulo foca-se na idealização de um modelo que permita avaliar, em situações de seca, se os níveis da albufeira poderão atingir níveis críticos prejudiciais à continuidade do seu funcionamento, através do conhecimento dos valores de caudais e volumes ocorridos na barragem de Pretarouca.

O modelo que se pretende desenvolver acompanha um funcionamento idêntico ao Sistema de Vigilância e Alerta de Recursos Hídricos – SVARH, pertencente ao SNIRH. Na Figura 56 é apresentado um esquema de funcionamento dividido por três módulos

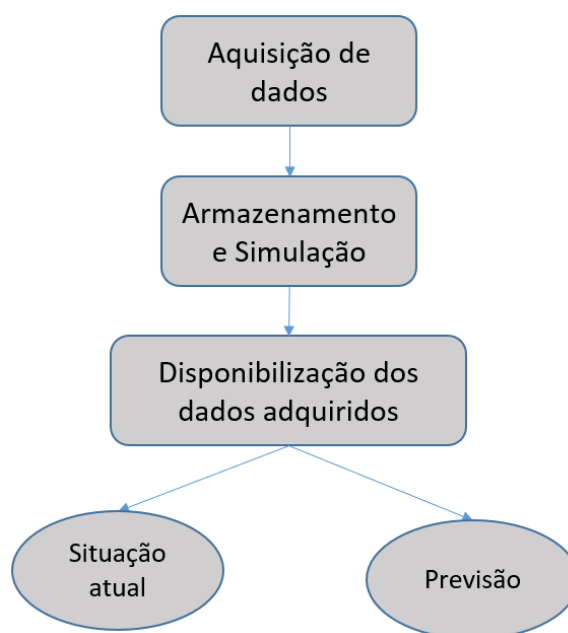


Figura 56 - Esquema de funcionamento do Sistema de Previsão e Alerta de Recursos Hídricos

Para a construção do modelo que funcione como sistema de alerta é necessário definir, à partida, os seguintes módulos:

- Aquisição de dados: é realizada por intermédio de estações automáticas com telemetria. Como referido ao longo do trabalho, a Empresa Águas do Norte S.A. dispõe de um sistema responsável pelas leituras horárias dos níveis da albufeira, caudais descarregados, captados e infiltrados e ainda uma estação meteorológica que dispõe dos valores da precipitação na barragem de Pretarouca. Funcionam de forma autónoma, carecendo apenas de manutenção para limpeza e calibração;
- Armazenamento e processamento dos dados: Integração de uma plataforma informática que arquiva os dados numa base de dados central, provida de ferramentas de gestão e análise de dados.
- Disponibilização: De uma forma intuitiva, demonstra a evolução e transformação comportamental da albufeira, de forma a apresentar a informação armazenada atual e as previsões como base em séries de precipitação históricas.

Para análise e verificação dos resultados apresentados (essencial para perceber qual o grau comportamental da albufeira) é idealizada a criação de uma aplicação, que consiste na avaliação aos níveis da água e volumes armazenados na albufeira e uso de uma metodologia de prevenção e alerta de secas, tendo em conta o seu grau de regularização, a possibilidade da sua aplicação de modo contínuo no tempo e a previsão de ocorrência de secas com base em séries de precipitação históricas com fiabilidade e antecedência suficientes de forma a que, em tempo oportuno, se possam criar condições alternativas adequadas ao cumprimento das necessidades de abastecimento urbano.

5.5.1.AVALIAÇÃO DAS PREVISÕES

Relativamente às previsões obtidas por intermédio das séries históricas de precipitação, o objetivo subjacente ao desenvolvimento da metodologia de avaliação e gestão de situações de seca é permitir

uma avaliação do risco de seca, dada uma gestão antecipada do mesmo e tendo em conta que estas situações acontecem por parte de uma anomalia transitória da precipitação para uma dada região e período específico (Vivas, 2011).

Assim sendo, de modo a avaliar o risco de seca, é necessário fixar a escala temporal de análise e definir cenários adequados a essa escala que proporcionem um enquadramento da possível evolução da precipitação. Visto tratar-se de uma albufeira destinada a abastecimento urbano, interessa que a escala temporal de avaliação do risco de seca abranja essencialmente o período mais crítico do ano, de forma a garantir o abastecimento às populações, ou seja, o período de Verão (junho, julho, agosto e setembro).

De salientar que neste trabalho é apenas apresentada a metodologia do sistema a desenvolver. Na realidade, devido à indisponibilidade dos dados das redes de monitorização, nomeadamente no que respeita aos dados mais recentes (2012-2018), a sua aplicação a potenciais previsões de aflúências apenas será exequível se for garantido o acesso em tempo útil aos dados históricos (potencialmente) disponíveis no portal público do SNIRH, anteriormente descrito em 4.3. Toma ainda um papel importante na elaboração futura de cenários de precipitação à empresa Águas do Norte na barragem de Pretarouca, e que entrou em funcionamento no início de 2017. Importa, contudo, evidenciar que a avaliação deve considerar uma base mensal que pode contar com os dados reais de precipitação e das demais variáveis instrumentais analisadas.

Os cenários de precipitação, essenciais para o processo de avaliação desenvolvido, foram determinados de acordo com o histórico de registos existentes entre 1963/64 e 1994/95, evidenciados em 4.3. Desta vez, foram analisados os valores da precipitação mensal disponíveis no portal do SNIRH.

Na Figura 57, estão representados os valores de precipitação mensal nos 30 anos hidrológicos em análise, em que cada cor representa um ano hidrológico.

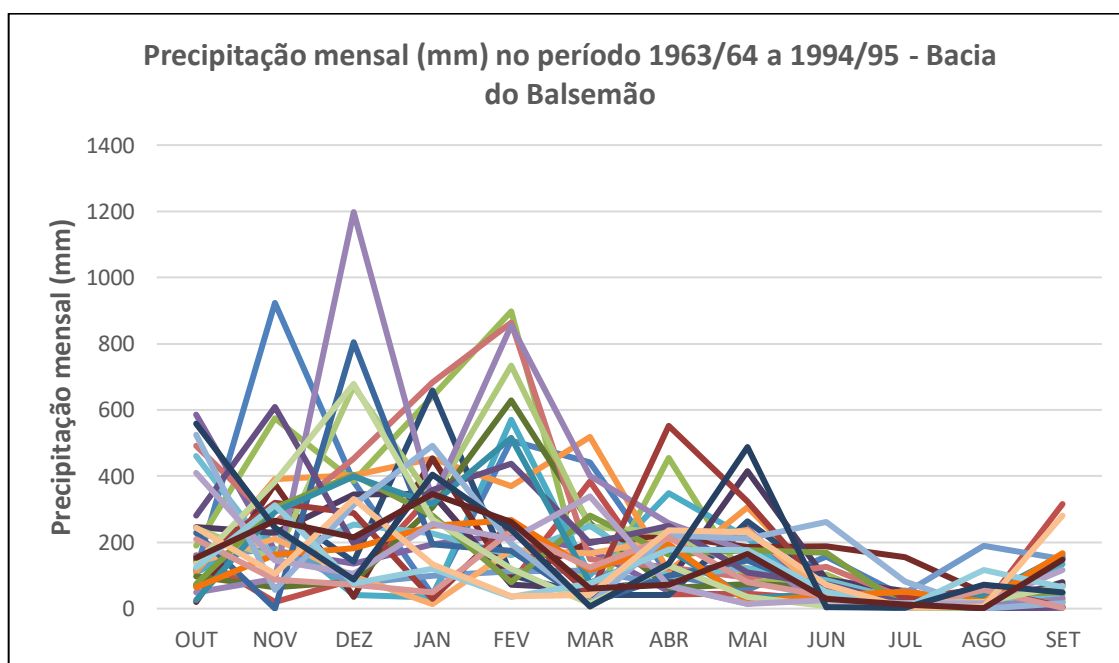


Figura 57 - Evolução mensal da precipitação (mm) no período compreendido entre 1963/64 e 1994/95

Analisando a figura, constata-se não ser possível verificar qualquer tendência particular, excetuando os meses de junho, julho e agosto, que apresentam baixos valores de precipitação mensal. Atendendo ainda aos valores da precipitação, retira-se que alguns anos hidrológicos (1964/65, 1975/76, 1980/81, 1988/89 e 1991/92) apresentam valores anuais muito abaixo da média total, por conseguinte, são definidos como os principais anos de seca.

Pretendendo, por outro lado, examinar em que medida a sequência de valores de precipitação mensal define a ocorrência de secas, foi avaliada para a albufeira de Pretarouca, a precipitação acumulada mensal, no período compreendido entre 1963/64 a 1994/95. Os resultados referentes ao período em análise são apresentados na Figura 58, em que cada cor representa um ano hidrológico.

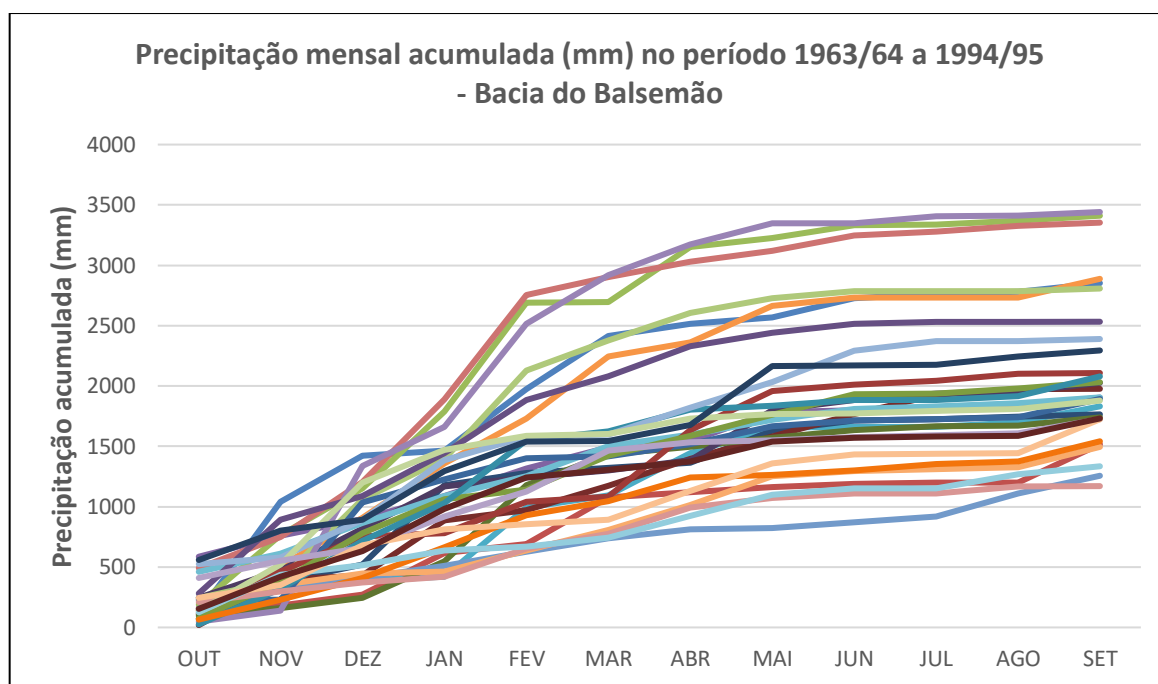


Figura 58 - Precipitação acumulada (mm) no período compreendido entre 1963/64 e 1994/95

Como se verifica pela análise na Figura 58, a inconstância observada nos valores da precipitação acumulada mensal ao nível do ano hidrológico, não permite instituir qualquer padrão ou tendência, exceto nos meses de julho, agosto e setembro, em que é constatada relativa estabilidade. Posto isto, na Figura 59 é efetuada uma análise da precipitação acumulada para os anos de seca acima identificados. Como termo de comparação, é considerado o ano hidrológico mais húmido (1965/66) e ainda a mediana da precipitação acumulada mensal correspondente ao período analisado.

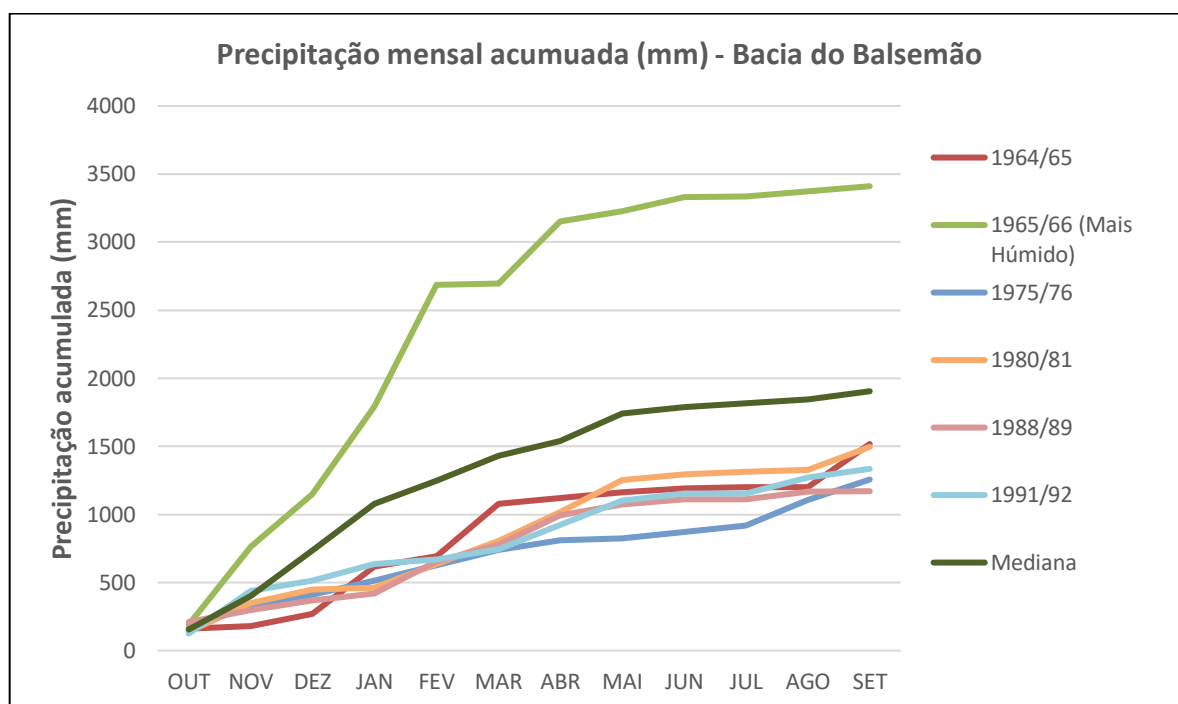


Figura 59 - Avaliação da precipitação acumulada (mm) nos principais anos secos do período compreendido entre 1963/64 a 1994/95

Da análise da Figura 59, salienta-se como mais gravosa a situação de seca no ano hidrológico de 1988/89, em que os valores da precipitação acumulada ao longo do ano foram sempre muito reduzidos. É possível comprovar que para as situações de seca analisadas, o valor da precipitação acumulada fica abaixo da mediana a partir de novembro. Por outro lado, constata-se a relativa estabilidade a partir dos meses de abril/maio, até ao final do ano hidrológico.

Confirma-se que a análise de dados da precipitação acumulada pode constituir uma boa base de apreciação da evolução da precipitação ao longo do ano hidrológico permitindo a identificação de situações de seca. É, assim, considerada razoável a definição de cenários enquadradores de diferentes situações hidrológicas a partir dos valores de precipitação mensal acumulada, considerando os descritores estatísticos mensais (percentil 25,50 e 75).

Os valores da precipitação mensal associados a cada um destes percentis são apresentados para o período de 30 anos hidrológicos em análise na Tabela 35, sendo posteriormente efetuada uma comparação entre os valores da precipitação mensal acumulada nos anos de seca identificados no período de 30 anos analisado e os valores mensais acumulados correspondentes aos percentis P25, P50 e P75 (Figura 60).

Tabela 35 - Valores dos percentis 25,50 e 75 mensais (mm) para a albufeira de Pretarouca, no período em análise

Meses	P 25	P 50	P 75
out	105,83	154,94	249,81
nov	135,11	233,29	314,22
dez	88,33	206,03	388,29
jan	179,48	293,75	370,13
fev	118,22	236,49	455,01
mar	56,11	121,08	252,34
abr	79,61	133,03	219,83
mai	75,21	155,34	217,16
jun	29,36	52,59	86,64
jul	2,66	13,02	31,13
ago	4,51	17,34	38,80
set	30,84	68,40	149,86

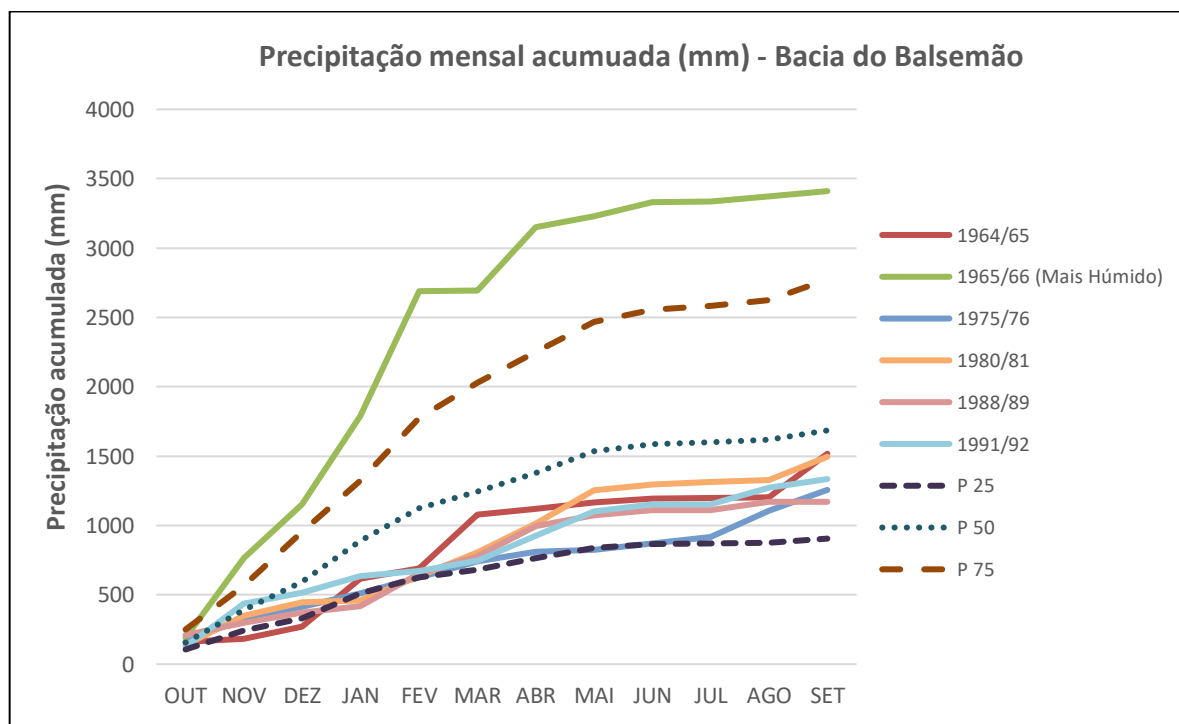


Figura 60 - Comparação da precipitação acumulada nos principais anos secos e no período em análise com os valores correspondentes dos descritores P25, P50 e P75

Como se conclui da análise da Figura 60, os valores da precipitação acumulada nos considerados anos secos do período em análise situam-se genericamente no intervalo compreendido entre os valores acumulados dos descritores P25 e P50. Por isso, para desenvolvimento do estudo da definição de cenários enquadramentos de diferentes situações hidrológicas nesta albufeira, a linha correspondente ao P50 pode ser definida como o limiar ou alerta de seca, visto que todos anos hidrológicos secos

identificados, ficam abaixo desta linha. Face a eventuais estudos dos limites, inferior ou superior, as linhas representativas dos percentis P25 e P75 poderão representar um intervalo de variabilidade dos valores da precipitação acumulada.

Para estimar o volume de escoamento afluente à albufeira, optou-se por considerar o método precipitação-escoamento utilizado em projeto, com base na fórmula de Turc. Assim, através dos valores de precipitação, é possível determinar o volume do escoamento afluente à albufeira. Atentos os intervalos de valores da precipitação mensal acumulada definidos pelas linhas representativas dos percentis P25, P50 e P75, definem-se os correspondentes escoamentos mensais afluentes à albufeira (Figura 61). Os valores referentes ao escoamento afluente mensal (nos anos hidrológicos 1964/65, 1975/76, 1980/81, 1988/89, 1991/92, P25, P50 e P75) são apresentados no Anexo C.

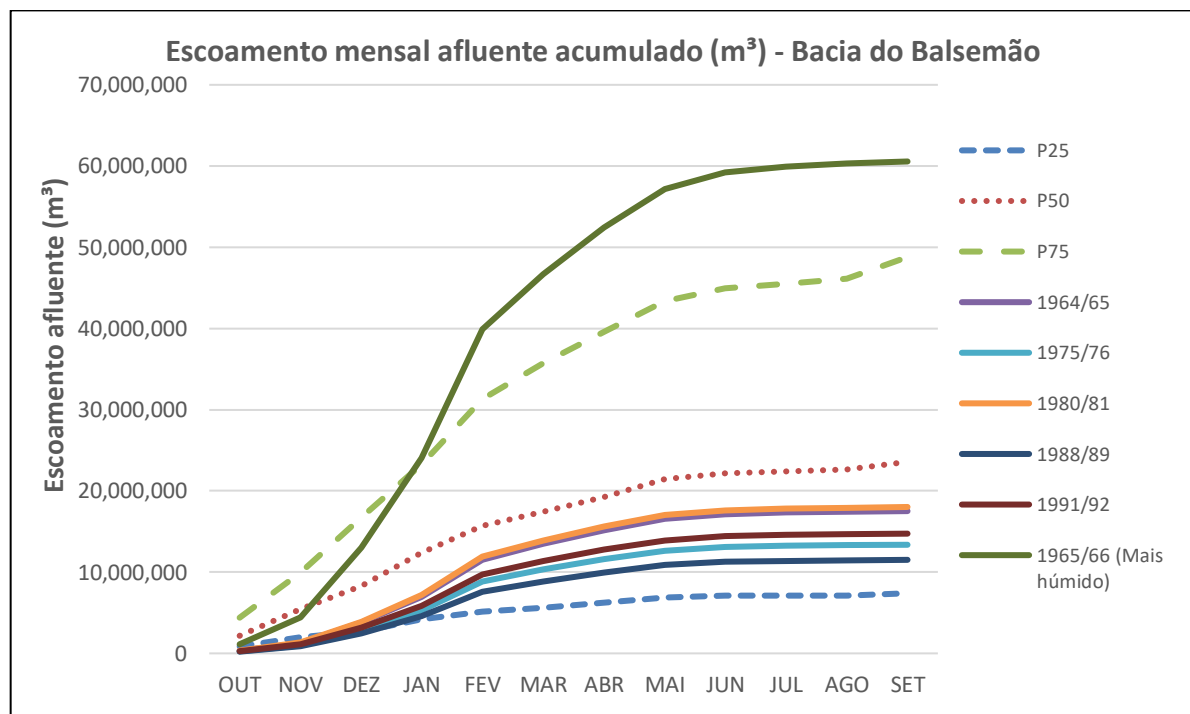


Figura 61 - Avaliação dos escoamentos afluentes acumulados mensais nos principais anos secos e comparação com os escoamentos afluentes acumulados mensais dos descritores P25, P50 e P75

Como se pode observar na Figura 61, e como seria de esperar, os escoamentos mensais afluentes acumulados aumentam mais notoriamente no período mais chuvoso do ano (entre novembro e maio). Tal foi, também, naturalmente verificado na observação contínua ao longo de todo o período desde que a albufeira se encontra em exploração.

Conclui-se que os resultados obtidos pela comparação efetuada pelos descritores P25, P50 e P75 permite avaliar diferentes cenários enquadradores de diversas situações hidrológicas, face aos registos dos valores da precipitação. Assim, na qualidade de representação desses cenários é razoável relacionar a precipitação com o escoamento afluente, para que na disponibilização dos dados adquiridos, seja benéfico retirar informação quem possam ser proveitosas à evolução e transformação comportamental da albufeira.

5.5.2.AVALIAÇÃO DA SITUAÇÃO CORRENTE NA ALBUFEIRA

Conforme reiteradamente referido ao longo deste trabalho, existe uma monitorização contínua dos níveis de água e correspondentes volumes armazenados na albufeira de Pretarouca. A avaliação dos volumes armazenados constituirá, naturalmente, um dos indicadores de avaliação no sistema de alerta de recursos hídricos. Na secção 5.2.4.2 é representada a respetiva série mensal de volumes mínimos armazenados, bem como os níveis de água mínimos. Pela análise dos volumes mínimos armazenados desde o início da monitorização da albufeira de Pretarouca (01/10/2011), pôde verificar-se que, em momento algum, a albufeira chegou a uma situação pontual em que o volume armazenado foi inferior à sua capacidade útil (671 497,80 m³). O caso mais crítico, em que albufeira registou o valor mais reduzido ocorreu em novembro de 2016 e correspondeu a uma cota do nível da água de 913,31 com um volume de armazenamento correspondente a 1 188 336 m³.

Atendendo à possibilidade de monitorização contínua, pretende-se desenvolver um sistema de alerta que abrange três níveis da água na albufeira (Amarelo, Laranja e Vermelho), face aos baixos níveis de água que poderão ocorrer nomeadamente em anos hidrológicos secos.

Assim, de forma a iniciar o sistema que abrange os três níveis de alerta, começou por se determinar a situação mais gravosa correspondendo ao nível de alerta mais grave (nível de alerta vermelho). Foi realizada uma simulação do balanço hídrico respeitante a 2 anos com volumes de escoamento afluente anual baseados nos valores de precipitação definidos pelo descritor estatístico P25, representado na Figura 61. Considerou-se que esta simulação seguia um procedimento idêntico ao apresentado na secção 5.3.2, supondo que o volume de água destinado a abastecimento urbano contabilizasse 100% da população que estaria prevista em projeto (3 708 839 m³). O resultado da mesma revelou que o nível mais baixo que a albufeira atinge no primeiro ano de simulação é de 912,47, no final de setembro. Ainda assim, em momento algum, a albufeira de Pretarouca desde que se encontra em exploração atingiu uma cota tão reduzida quanto a verificada. Por este motivo, considera-se que a cota do nível de albufeira de 912,47 é definida como o nível de alerta mais gravoso (nível de alerta vermelho). A situação de alerta vermelho indica uma situação de persistência e agravamento da situação de seca que origina possível rotura no serviço de abastecimento de água, o que leva a impor medidas de carácter excepcional. O balanço hídrico relativo a esta simulação é apresentado na Tabela 42 no Anexo D.

Os outros dois níveis de alerta foram definidos com base nos níveis da água na albufeira observados no período compreendido entre 01/10/2011 e 01/06/2018. Face à análise realizada às Figuras 44 e 45, reparou-se que a albufeira atingiu a cota 914,0 por duas vezes durante os 7 anos hidrológicos de observação. Desta análise resulta que os baixos níveis da água na albufeira resultaram de um período de seca prolongada, em que se verificaram baixos ou nenhuns volumes de escoamento afluente. Assim, face à exposição de uma situação que indica a deteção de sinais premonitórios de seca persistente, optou-se por definir o nível de alerta laranja à cota 914,0.

Por último, o nível de alerta menos gravoso (nível de alerta amarelo) foi definido com base no nível da água na albufeira no final do ano hidrológico 2012/13. Apesar de este ano hidrológico ter apresentado volumes de escoamento afluente elevados do ponto de vista anual (42 036 570 m³), demonstrou a ausência de aflúncias em três meses consecutivos (julho, agosto e setembro). De facto, o maior influenciador nas descidas acentuadas dos níveis de água na albufeira são os períodos de seca prolongada, com baixos ou nenhuns volumes de escoamento afluente. Optou-se por isso, por definir o nível de alerta amarelo à cota observada no final de setembro do ano hidrológico de 2012/13 (916,48).

A Figura 62 representa a cota do nível da água na albufeira de Pretarouca no período compreendido entre 01/10/2011 e 01/06/2018, com os diferentes níveis de alerta acima descritos.

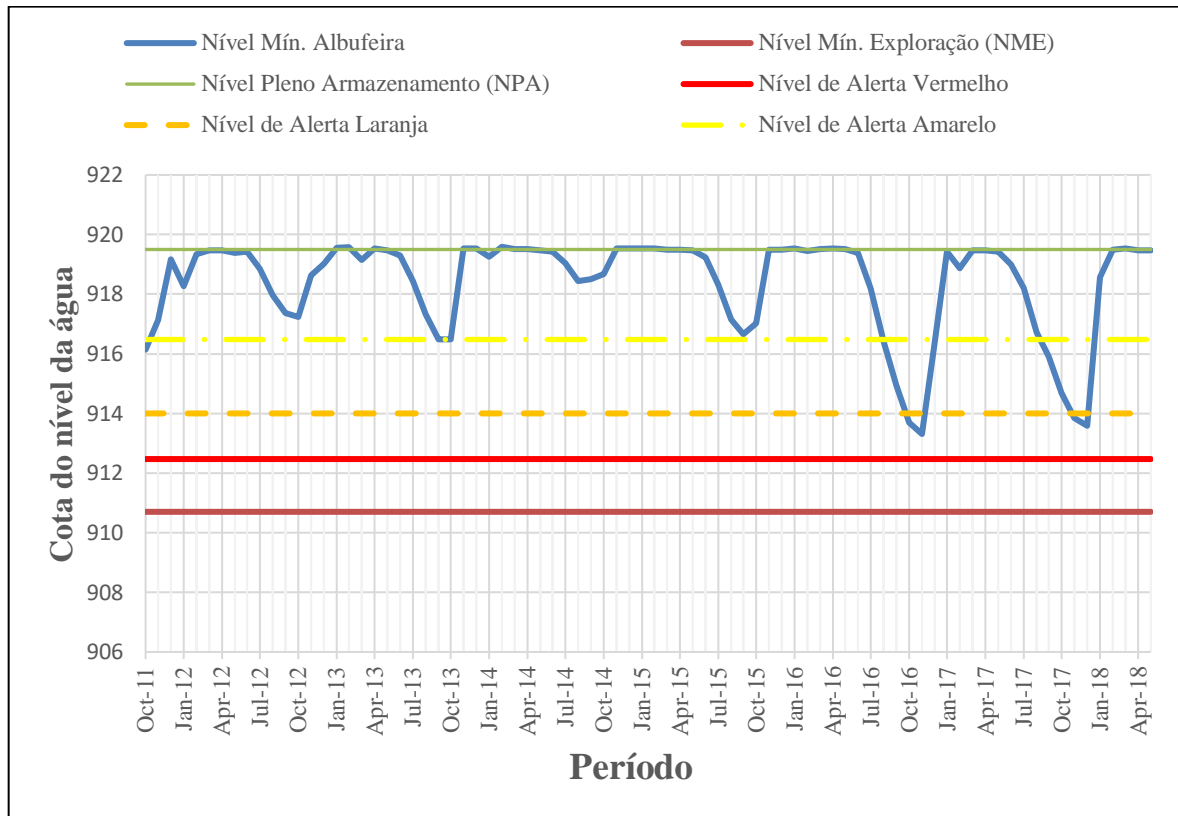


Figura 62 - Representação dos níveis de alerta a aplicar no caso de estudo, para o período de 01/10/2011 a 01/06/2018

O objetivo da implementação dos níveis de alerta é de prevenir a que albufeira chegue a situações graves, para posteriormente, proceder à adoção de medidas de cariz preventivo, o qual devem ser alvo de desenvolvimento, mesmo não chegando a ocorrer qualquer afetação do abastecimento da população.

É necessário identificar o nível de intervenção. O espaço e a sua evolução temporal, assim como as previsões obtidas através das séries históricas de precipitação devem representar um papel preponderante na contemplação das medidas a tomar.

Assim, tendo por base a informação compilada, em 5.2.4.2 – referente às cotas dos níveis da água no período de 2011/12 a 2017/18 – foi considerado que após os níveis da albufeira atingirem as cotas descritas pelos níveis de alerta seriam adotadas medidas de prevenção, sendo elas:

- Alerta Amarelo: Recarga de pontos de água de apoio ao combate a incêndios florestais; Colocação de torneiras redutoras de consumo em todos os fontanários públicos;
- Alerta Laranja: Adoção de medidas de sensibilização para o uso eficiente de água (Redução do número de descargas; Banhos rápidos; evitar lavagem de viaturas e pavimentos...); Encerramento de fontanários; Encerramento de piscinas.
- Alerta Vermelho: Colocação de reservatórios para uso da população; reativação de furos; instalação de drenos nos leitos dos rios.

No caso da albufeira de Pretarouca, a prioridade será sempre assegurar o abastecimento de água à população em qualidade e quantidade. Seguindo constantemente os cenários enquadradores de diferentes situações hidrológicas em prol da evolução temporal, e através das correlações precipitação-escoamento, pode-se, então, considerar que, com base em cenários de referência meteorológicos, para situações de seca “tipo”, será possível relacionar as séries de precipitação, nomeadamente em anos hidrológicos secos com os volumes de escoamento afluentes à albufeira, revelando possíveis consequências e no decorrer da monitorização constante dos níveis da água, potenciar a adoção de medidas preventivas.

6

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA O FUTURO

No âmbito da presente dissertação, pretendeu-se desenvolver e aplicar uma metodologia de cálculo dos volumes de escoamento afluentes para a bacia do Balsemão, mais propriamente à albufeira de Pretarouca, face a um determinado estudo hidrológico projetado com base numa série histórica de 30 anos (1963/64 a 1994/95). Este estudo deve-se à ausência de aflúências em vários meses de estiagem e, por esse motivo, sugeriu-se apurar – entre 01/10/2011 a 01/06/2018 – o balanço hídrico mensal final da albufeira referente aos volumes de escoamento afluentes à albufeira de Pretarouca, apresentados no subcapítulo 4.4.

Na análise da gestão da albufeira de Pretarouca procurou-se efetuar uma sistematização mensal da informação existente, de forma a corporizar a componente informativa organizada. Atendendo às conclusões inferidas através da análise dos resultados, teve-se sempre em consideração que as prioridades da albufeira de Pretarouca são o cumprimento exigente das descargas de caudal de ecológico e o dever em satisfazer as necessidades do setor do abastecimento urbano.

Dada a sistematização mensal dos volumes de escoamento afluente à barragem de Pretarouca no período em análise, considerou-se que face ao ano hidrológico mais seco observado – ano hidrológico 2016/17 – seria essencial avaliar uma potencial melhoria na gestão das albufeiras em estudo de situações de seca. Neste sentido procedeu-se à simulação do estudo de um evento hipotético. Com o volume de escoamento afluente correspondente aos volumes afluentes no ano mais seco observado – ano hidrológico 2016/17 – foi objetivo analisar o desempenho da albufeira face a dois anos consecutivos nestas condições. Assim, simularam-se dois cenários: O primeiro contou com os volumes captados e destinados ao abastecimento, correspondentes a 70% da população prevista em 2017 (36 830 habitantes). O seu resultado demonstrou que a albufeira estaria preparada para cumprir as suas prioridades face a 2 anos com volumes de escoamento afluentes muito reduzidos, atingindo o nível mínimo da albufeira à cota 913,5. Para o segundo, utilizou-se o volume total de abastecimento para a população que estaria prevista abastecer em 2017 (52 993 habitantes). Contudo, neste segundo cenário apurou-se falha no cumprimento dos parâmetros de segurança operacional do sistema pois o nível mínimo de exploração da albufeira (NME) foi alcançado (910,7). Recorde-se que os dois cenários se diferenciaram um do outro, pela alteração dos volumes captados. Face à variação dos níveis da água na albufeira, também os volumes evaporados sofrem alterações.

No seguimento do exposto, ao observar o comportamento da albufeira no segundo cenário – abastecimento total (100%) – propôs-se a observação da albufeira para as mesmas condições do segundo cenário tendo em consideração a subida de 0,5 metros do coroamento da barragem. Revelou ser uma solução bastante afirmativa, admitindo que tal não compromete a componente estrutural da segurança, atenta as solicitações e ações que se instalam na barragem. De facto, devido ao aumento significativo da capacidade de armazenamento, observou-se que, neste caso, já não ocorreria o referido evento de

falha, pois o nível de água mínimo atingido na albufeira ficou 1,10 metros acima do nível mínimo de exploração considerado em projeto.

No decorrer da exploração da albufeira de Pretarouca, a prioridade legal é, em primeiro lugar, garantir a quantidade de água para satisfação das necessidades do setor de abastecimento urbano. Contudo, esta prioridade não isenta o setor do abastecimento urbano da possibilidade da ocorrência de cortes ou limitações na satisfação das necessidades existentes em determinadas situações de seca. De facto, é essencial verificar e ter em atenção a ocorrência de impactos, adotando medidas preventivas ou mitigadoras. Nesse sentido, considerou-se a possibilidade de desenvolver um sistema de previsões e alerta de prevenção de secas, focando-se na idealização de um sistema que visa conhecer, através de séries históricas de precipitação, possíveis cenários críticos a que a albufeira poderá chegar. Tendo em consideração os valores de precipitação históricos observados definiram-se possíveis cenários meteorológicos (comparação com os valores da precipitação dados pelos descritores estatísticos P75, P50 e P25), e através da determinação dos volumes de escoamento afluentes à albufeira conseguem-se desenvolver balanços hídricos, que em conformidade com a monitorização constante dos níveis horários obtidos na albufeira, torna-se possível idealizar o desempenho da albufeira e posterior acionamento de ações de resposta a estas situações através da adoção de medidas preventivas.

A maior dificuldade verificada no decorrer desta dissertação e, possivelmente, aquele que foi o principal limitador da qualidade dos resultados analisados, foi a falta de informação relativa aos valores de séries de precipitação para o período de 7 anos hidrológicos analisados, compreendido entre 01/10/2011 e 01/06/2018. Por esse motivo, considera-se que a monitorização contínua e fiável da precipitação e do escoamento superficial permitiria aumentar o leque de análises, avaliações finais e desenvolvimentos futuros para a presente tese.

Não obstante, além de desenvolvimentos pontuais que poderão permitir resultados mais rigorosos e fidedignos, uma abordagem que poderá causar uma eventual melhoria dos resultados finais a prever será a consideração das alterações climáticas. O aprofundamento dos impactos das alterações climáticas a maior escala poderá proporcionar uma melhoria na metodologia e na aplicação apresentada a longo prazo.

Por fim, como potencial desenvolvimento futuro do trabalho agora apresentado, sugere-se, ainda:

- O estudo da instalação de comportas no descarregador de cheias, até ao nível máximo de cheia (NMC). Dada a área científica em que se insere a tese, não faz parte dos objetivos abordar as alterações que a componente estrutural sofreria, caso ocorresse a colocação de comportas ou mesmo a subida do coroamento. Estabelecido este propósito, e atenta a análise realizada, seria benéfico ao aumento da capacidade de armazenamento da albufeira, visto ter-se verificado, sem exceção, o rápido enchimento e as contínuas descargas da mesma em meses médios e húmidos (habitualmente, de novembro a junho).
- Redução dos valores dos caudais ecológicos para o período de estiagem (julho, agosto e setembro). Proceder a um ajustamento dos valores mínimos de caudais ecológicos, constituindo uma reserva suplementar nos meses mais húmidos, de forma a compensar a capacidade da albufeira em meses de estiagem.
- Desenvolver uma modelação hidrológica da bacia de Pretarouca e correspondente calibração, dada a possibilidade de ter acesso a dados de precipitação.
- Desenvolver uma ferramenta intuitiva que estabeleça a ligação entre as várias componentes desenvolvidas, corporizando um sistema completo de previsão e alerta de situações de seca para a albufeira de Pretarouca.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- APA - Agência Portuguesa do Ambiente. *Questões significativas da gestão da água. Região Hidrográfica do Douro (RH3)*. 2014.
- APA - Agência Portuguesa do Ambiente. *Plano de Gestão de Região Hidrográfica*. (2016).
- Águas do Norte S.A. (2007). Fotos fornecidas por Águas do Norte.
- Águas do Norte S.A. (2013). Fotos fornecidas por Águas do Norte.
- Águas do Norte S.A. (2018). Fotos fornecidas por Águas do Norte.
- Araújo, J. C. De; Güntner, A.; Bronstert, A. (2005) - *Loss of reservoir volume by sediment deposition and its impact on water availability in semiarid Brazil*. Hydrological Sciences Journal.
- Bowen, I. S. (1926) - *The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface*. Physical Review. Vol. 27, nº 6, 779-787.
- Branco, Pedro; Moreira, Maria; Vasconcelos, Carmen; Cardoso, Catarina; Góis, Joaquim (2010) - *Estudo, Caracterização e modelação de regimes pluviométricos em ambientes urbanos, os casos de estudo de algumas cidades portuguesas e estrangeiras*. Gray's Anatomy: Selected Writings. 21–51.
- Bras, Rafael L. (1990) - *Hydrology, An introduction to Hydrologic Science*. 155-171.
- Brown, L. R. (1995) - *Who Will Feed China? The Futurist*. Vol 30.
- Brutsaert, Wilfried (1982) - *Evaporation into the atmosphere: Theory, history, and applications*.
- Brutsaert, Wilfried (2005) - *Hydrology: An Introduction*.
- CENOR Consulting Engineers (2007). Estudo Hidrológico e Dimensionamento Hidráulico
- Chow, V. T. (1964) - *Hankbook of Applied Hydrology*. 80-91
- Decreto-Lei nº 235/83, Diário da República nº125/1983, Série I de 1983-05-31, Ministério do Ambiente – Regulamento de Segurança de Barragens
- Demirbas, A. (2009) - *Global renewable energy projections*. Energy Sources, Part B: Economics, Planning and Policy. Vol 4, nº 2, 212–224.
- Dunne, Thomas; Leopold, Luna B. (1978) - *Water in Environmental Planning*.
- Finch, Jon; Calver, Ann (2008). *Methods for the quantification of evaporation from lakes*. Report. October. 47.
- Gradmann, C. (2001). *Robert Koch and the pressures of scientific research: tuberculosis and tuberculin*. Medical history. Vol 45, 1-32.
- Graf, W. L.; Wohl, E.; Sinha, T.; Sabo, J. L. (2010). *Sedimentation and sustainability of western American reservoirs*. Water Resources Research. Vol 46
- Guimarães, Rita (2005). *Simulação no dimensionamento e gestão de sistemas de recursos hídricos. Geração de séries sintéticas de escoamento*. Dissertação de Doutoramento, Universidade de Évora.
- Hargrove, W. L.; Johnson, D.; Snethen D.; Middendorf J. (2010) - *From dust bowl to mud bowl: Sedimentation, conservation measures, and the future of reservoirs*. Journal of Soil and Water Conservation. Vol 65

- Instituto Português da Qualidade (1999). *Qualidade da água distribuída por sistemas públicos de abastecimento*.
- Jones, Frank E. (1992) - *Evaporation of Water with Emphasis on Applications and Measurements*.
- Linsley Jr.; Ray K.; Kohler, Max A.; Pauhus, Joseph L. H. (2008) - *Hydrology for Engineers*
- Klemeš, V. (1987). *One hundred years of applied storage reservoir theory*. Water Resources Management. Vol 1 159-175
- Lameiro, Luísa (2009). *Sedimentação em albufeiras e estudo da possibilidade de utilização dos sedimentos em alimentação artificial de praias*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Lehner, Bernhard *et al.* (2011). *Global Reservoir and Dam (GRanD) database*. European Environment.
- Lencastre, A.; Branco, F. M. (2010). *Lições de Hidrologia*. 3ª edição
- Lettenmaier, Dennis; Milly, P. (2009)- *Land waters and sea level*. *Nature Geoscience*. Nature Publishing Group
- Maia Rodrigo (2008). Hidrologia e Recursos Hídricos: Apontamentos teóricos e práticos da cadeira de 3ºano do curso de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia do Porto.
- Maia, Rodrigo (2015). Hidrologia e Recursos Hídricos: Apontamentos teóricos e práticos da cadeira de 3ºano do curso de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia do Porto.
- Martins, Ana Rita (2016). *Quantificação do efeito da evaporação no dimensionamento da capacidade útil de albufeiras*. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico de Lisboa.
- McMahon, Thomas A.; Pegram, Geoffrey G. S.; Vogel, Richard M.; Peel, Murray C. (2007) - *Revisiting reservoir storage-yield relationships using a global streamflow database*. *Advances in Water Resources*. Vol 30, nº 8, 1858-1872.
- McMahon, Thomas A.; Adeloye, Adebayo (2005). *Water Resources Yield*
- Meza, Francisco; Varas, Eduardo (2000). *Estimation of mean monthly solar global radiation as a function of temperature*. *Agricultural and Forest Meteorology*. Vol 100, nº 2-3, 231-241.
- Minear, J. T.; Kondolf G. M. (2009) - *Estimating reservoir sedimentation rates at large spatial and temporal scales: A case study of California*. *Water Resources Research*. Vol 45, nº 12.
- Moran, P. (1959). *The theory of storage*. London
- Morris, Gregory L.; Fan, Jiahua - *Reservoir sedimentation handbook : design and management of dams, reservoirs, and watersheds for sustainable use*. New York (N.Y.): McGraw-Hill, 1998
- Mulholland, P. J.; Elwood, J. W. (1982). *The role of lake and reservoir sediments as sinks in the perturbed global carbon cycle*. *Tellus*. Vol 34, nº 5, 490-499.
- Oliveira, Rodrigo (2010). *Evaporação e Evapotranspiração* - Instituto Superior Técnico de Lisboa.
- Penman, H. L. (1948). *Natural evaporation from open water, bare soil and grass*.
- Priestley, C. H. B.; Taylor, R. J. (1972). *On the Assessment of Surface Heat Flux and Evaporation Using Large-Scale Parameters*. *Monthly Weather Review*. Vol 100, nº 2, 81-92.
- Quintela, António Carvalho (2011). *Hidráulica*
- Rippl. W. (1883). *The capacity of storage reservoirs for water supply*. *Minutes of proc.* Nº71, 270-278.

- Rosenberry, Donald O.; Winter, Thomas C.; Buso, Donald C.; Likens, Gene E. (2007). *Comparison of 15 evaporation methods applied to a small mountain lake in the northeastern USA*. Journal of Hydrology. Vol 340, nº 3-4, 149-166.
- Sá, Nuno (2012). *Optimização de sistemas prediais de distribuição de água fria*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Sene, K. J.; Gash, J. H. C.; McNeil, D. D. (1991). *Evaporation from a tropical lake: comparison of theory with direct measurements*. Journal of Hydrology. Vol 127, nº 4, 193-217.
- Shuttleworth, W. J. (1994). Evaporation. *Handbook of hydrology*
- Silva, Ana Cristina (2009). *Reforço estrutural de Barragens Abóbada visando o seu Alteamento*. Dissertação de Mestrado da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Silva, Artur Tiago C. F. (2010). *Design of the storage capacity of artificial reservoirs*. Dissertação de Mestrado do Instituto Superior Técnico de Lisboa.
- Silva, Maria Manuela Portela C. S. R. (2013). *Da regionalização de informação hidrométrica ao dimensionamento de albufeiras de regularização e à análise de incertezas*. Instituto Superior Técnico.
- Snow, John (1855). *Mode of communication of cholera*. London
- Szeicz, G. (1974). *Solar Radiation for Plant Growth*. Journal of Applied Ecology.
- Thomas, Harold A.; Burden, Robert P. (1982). *Operations Research in Water Quality Management*
- Vardavas, Ilias Mihail; Fountoulakis, Antonis (1996). *Estimation of lake evaporation from standard meteorological measurements: application to four Australian lakes in different climatic regions*. Ecological Modelling. Vol 84, 139-150.
- Vaz, Álvaro Carmo (1984). *Modelos de Planeamento de sistemas de albufeiras em condições de incerteza*. Dissertação de Mestrado do Instituto Superior Técnico de Lisboa.
- Vaz, Álvaro Carmo; Hipólito, João Reis (2011). Hidrologia e Recursos Hídricos: Apontamentos teóricos e práticos da unidade curricular de 3ºano do curso de Engenharia Civil do Instituto Superior Técnico.
- Vaz, Jorge André M. C. (2010). *Modelos de Transformação da precipitação em escoamento à escala mensal: aplicação a três casos de estudo em Moçambique*. Dissertação de Mestrado do Instituto Superior Técnico.
- Vivas, Eduardo (2011). *Avaliação e Gestão de Situações de Seca e Escassez-Aplicação ao caso do Guadiana*. Dissertação de Doutoramento da Faculdade de Engenharia do Porto.
- Vivas, Eduardo; Maia, Rodrigo (2008). Vantagens na Aplicação de Modelos de Apoio à Decisão na Gestão e Prevenção de Situações de Seca. 3ª Jornadas de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente. FEUP.
- Wang Z.; Hu C. (2009). *Strategies for managing reservoir sedimentation*. International Journal of Sediment Research. Vol 24, 369-380.
- World Health Organization (2004). *Guidelines for Drinking-water Quality*. World Health Organization. Geneva.
- World Commission on Dams (2000). *Dams and Development: A new framework for decision-making*. Vol 23, 58-63.

- [2] <http://cenor.pt/pt-pt/portfolio/barragem-de-pretarouca-2/>> 15/06/2018
- [3] <https://www.weatheravenue.com/pt/europe/pt/viseu/lamego-catalogo.html>>. 15/03/2018

ANEXOS

ANEXO A: AFLUÊNCIAS MENSAIS ESTIMADAS NO PERÍODO HISTÓRICO PARA A BARRAGEM DE PRETAROUCA

Tabela 36 - Volumes de escoamento afluente à albufeira de Pretarouca para o período compreendido entre 1963/74 a 1994/95

Ano	Mês	Afluências mensais (m³)	Ano	Mês	Afluências mensais (m³)
1963/64	Outubro	889 041	1966/67	Outubro	496 589
	Novembro	2 626 340		Novembro	1 466 988
	Dezembro	6 797 490		Dezembro	3 796 856
	Janeiro	8 712 598		Janeiro	4 866 572
	Fevereiro	12 534 657		Fevereiro	7 001 450
	Março	5 370 131		Março	2 999 580
	Abril	4 541 448		Abril	2 536 704
	Maio	3 743 758		Maio	2 091 141
	Junho	1 624 742		Junho	907 528
	Julho	523 637		Julho	292 486
	Agosto	295 259		Agosto	164 922
	Setembro	221 852		Setembro	123 919
1964/65	Outubro	325 267	1967/68	Outubro	467 505
	Novembro	960 881		Novembro	1 381 071
	Dezembro	2 486 951		Dezembro	3 574 486
	Janeiro	3 187 618		Janeiro	4 581 552
	Fevereiro	4 585 969		Fevereiro	6 591 396
	Março	1 964 733		Março	2 823 904
	Abril	1 661 548		Abril	2 388 137
	Maio	1 369 703		Maio	1 968 669
	Junho	594 433		Junho	854 377
	Julho	191 579		Julho	275 356
	Agosto	108 025		Agosto	155 263
	Setembro	81 168		Setembro	116 662
1965/66	Outubro	1 124 524	1968/69	Outubro	905 019
	Novembro	3 321 987		Novembro	2 673 544
	Dezembro	8 597 963		Dezembro	6 919 662
	Janeiro	11 020 332		Janeiro	8 869 191
	Fevereiro	15 854 752		Fevereiro	12 759 944
	Março	6 792 536		Março	5 466 650
	Abril	5 744 356		Abril	4 623 072
	Maio	4 735 379		Maio	3 811 045
	Junho	2 055 093		Junho	1 653 944
	Julho	662 334		Julho	533 048
	Agosto	373 466		Agosto	300 566
	Setembro	280 615		Setembro	225 840

1969/70	Outubro	441 536	1975/76	Outubro	248 276
	Novembro	1 304 353		Novembro	733 439
	Dezembro	3 375 924		Dezembro	1 898 286
	Janeiro	4 327 048		Janeiro	2 433 104
	Fevereiro	6 225 246		Fevereiro	3 500 463
	Março	2 667 037		Março	1 499 678
	Abril	2 255 477		Abril	1 268 257
	Maio	1 859 310		Maio	1 045 492
	Junho	806 916		Junho	453 730
	Julho	260 060		Julho	146 232
	Agosto	146 638		Agosto	82 455
	Setembro	110 181		Setembro	61 955
1970/71	Outubro	525 997	1976/77	Outubro	1 097 509
	Novembro	1 553 863		Novembro	3 242 182
	Dezembro	4 021 705		Dezembro	8 391 412
	Janeiro	5 154 770		Janeiro	10 755 587
	Fevereiro	7 416 075		Fevereiro	15 473 869
	Março	3 177 215		Março	6 629 357
	Abril	2 686 928		Abril	5 606 357
	Maio	2 214 978		Maio	4 621 620
	Junho	961 271		Junho	2 005 723
	Julho	309 807		Julho	646 423
	Agosto	174 689		Agosto	364 494
	Setembro	131 258		Setembro	273 874
1971/72	Outubro	430 234	1977/78	Outubro	870 385
	Novembro	1 270 965		Novembro	2 571 230
	Dezembro	3 289 511		Dezembro	6 654 856
	Janeiro	4 216 290		Janeiro	8 529 778
	Fevereiro	6 065 900		Fevereiro	12 271 637
	Março	2 598 769		Março	5 257 448
	Abril	2 197 744		Abril	4 446 153
	Maio	1 811 718		Maio	3 665 201
	Junho	786 262		Junho	1 590 649
	Julho	253 404		Julho	512 649
	Agosto	142 885		Agosto	289 064
	Setembro	107 361		Setembro	217 197
1972/73	Outubro	546 254	1978/79	Outubro	1 137 440
	Novembro	1 613 704		Novembro	3 360 143
	Dezembro	4 176 587		Dezembro	8 696 719
	Janeiro	5 353 288		Janeiro	11 146 910
	Fevereiro	7 701 679		Fevereiro	16 036 858
	Março	3 299 574		Março	6 870 554
	Abril	2 790 405		Abril	5 810 335
	Maio	2 300 280		Maio	4 789 770
	Junho	998 292		Junho	2 078 697
	Julho	321 739		Julho	669 942
	Agosto	181 416		Agosto	377 755
	Setembro	136 313		Setembro	283 838

1979/80	Outubro	495 449	1983/84	Outubro	548 413
	Novembro	1 463 619		Novembro	1 620 083
	Dezembro	3 788 136		Dezembro	4 193 098
	Janeiro	4 855 396		Janeiro	5 374 451
	Fevereiro	6 985 370		Fevereiro	7 732 125
	Março	2 992 691		Março	3 312 618
	Abril	2 530 879		Abril	2 801 436
	Maio	2 086 339		Maio	2 309 374
	Junho	905 444		Junho	1 002 238
	Julho	291 815		Julho	323 010
	Agosto	164 543		Agosto	182 134
	Setembro	123 635		Setembro	136 852
1980/81	Outubro	334 702	1984/85	Outubro	755 199
	Novembro	988 752		Novembro	2 230 953
	Dezembro	2 559 086		Dezembro	5 774 151
	Janeiro	3 280 077		Janeiro	7 400 945
	Fevereiro	4 718 987		Fevereiro	10 647 606
	Março	2 021 721		Março	4 561 676
	Abril	1 709 742		Abril	3 857 748
	Maio	1 409 432		Maio	3 180 148
	Junho	611 675		Junho	1 380 143
	Julho	197 136		Julho	444 805
	Agosto	111 158		Agosto	250 809
	Setembro	83 522		Setembro	188 453
1981/82	Outubro	492 039	1985/86	Outubro	568 036
	Novembro	1 453 547		Novembro	1 678 051
	Dezembro	3 762 068		Dezembro	4 343 130
	Janeiro	4 821 983		Janeiro	5 566 753
	Fevereiro	6 937 300		Fevereiro	8 008 786
	Março	2 972 097		Março	3 431 146
	Abril	2 513 462		Abril	2 901 674
	Maio	2 071 981		Maio	2 392 005
	Junho	899 213		Junho	1 038 099
	Julho	289 807		Julho	334 568
	Agosto	163 411		Agosto	188 650
	Setembro	122 784		Setembro	141 748
1982/83	Outubro	580 709	1986/87	Outubro	352 711
	Novembro	1 715 490		Novembro	1 041 953
	Dezembro	4 440 030		Dezembro	2 696 782
	Janeiro	5 690 953		Janeiro	3 456 567
	Fevereiro	8 187 471		Fevereiro	4 972 900
	Março	3 507 698		Março	2 130 503
	Abril	2 966 413		Abril	1 801 738
	Maio	2 445 373		Maio	1 485 269
	Junho	1 061 260		Junho	644 587
	Julho	342 033		Julho	207 743
	Agosto	192 859		Agosto	117 139
	Setembro	144 911		Setembro	88 016

1987/88	Outubro	695 989	1991/92	Outubro	273 692
	Novembro	2 056 042		Novembro	808 522
	Dezembro	5 321 444		Dezembro	2 092 615
	Janeiro	6 820 694		Janeiro	2 682 183
	Fevereiro	9 812 809		Fevereiro	3 858 808
	Março	4 204 030		Março	1 653 201
	Abril	3 555 292		Abril	1 398 090
	Maio	2 930 817		Maio	1 152 520
	Junho	1 271 936		Junho	500 179
	Julho	409 931		Julho	161 202
	Agosto	231 145		Agosto	90 896
	Setembro	173 678		Setembro	68 297
1988/89	Outubro	213 803	1992/93	Outubro	424 427
	Novembro	631 601		Novembro	1 253 813
	Dezembro	1 634 708		Dezembro	3 245 117
	Janeiro	2 095 266		Janeiro	4 159 388
	Fevereiro	3 014 422		Fevereiro	5 984 036
	Março	1 291 447		Março	2 563 697
	Abril	1 092 159		Abril	2 168 084
	Maio	900 325		Maio	1 787 267
	Junho	390 729		Junho	775 651
	Julho	125 928		Julho	249 984
	Agosto	71 006		Agosto	140 957
	Setembro	53 353		Setembro	105 912
1989/90	Outubro	378 781	1993/94	Outubro	656 536
	Novembro	1 118 968		Novembro	1 939 491
	Dezembro	2 896 111		Dezembro	5 019 788
	Janeiro	3 712 054		Janeiro	6 434 050
	Fevereiro	5 340 465		Fevereiro	9 256 552
	Março	2 287 976		Março	3 965 717
	Abril	1 934 911		Abril	3 353 753
	Maio	1 595 050		Maio	2 764 678
	Junho	692 231		Junho	1 199 834
	Julho	223 099		Julho	386 694
	Agosto	125 797		Agosto	218 042
	Setembro	94 521		Setembro	163 833
1990/91	Outubro	424 969	1994/95	Outubro	427 295
	Novembro	1 255 413		Novembro	1 262 284
	Dezembro	3 249 258		Dezembro	3 267 041
	Janeiro	4 164 695		Janeiro	4 187 489
	Fevereiro	5 991 671		Fevereiro	6 024 464
	Março	2 566 968		Março	2 581 017
	Abril	2 170 850		Abril	2 182 731
	Maio	1 789 548		Maio	1 799 342
	Junho	776 640		Junho	780 891
	Julho	250 303		Julho	251 673
	Agosto	141 136		Agosto	141 909
	Setembro	106 047		Setembro	106 628

ANEXO B: RESULTADOS DO MÉTODO DE CÁLCULO DA EVAPORAÇÃO

Tabela 37 - Resultados do método adotado para estimar a evaporação

Meses	lo	a	b	Insolação segundo Nebulosidade	Qs (cal/cm2. dia)	Qsr (cal/cm2. dia)	Temp. Média Mensal (°C)	Temp. Média Mensal (°K)	ea (tensão saturação) (mm HG)	ea (tensão saturação) (mb)	ew (tensão vapor) (mb)	Qlw (cal/cm2. dia)	Qn (cal/cm2. dia)	Δ (mmHg/K)	Δ (mb/°C)	Vento (km/h)	Vento (km/dia)	Ea (cm/dia)	H (cm/dia)	E (cm/dia)	E (mm/mes)
Jan	339,345	0,219	0,520	0,508	163,859	0,060	9,832	280,15	7,504	10,004	8,537	123,218	89,835	0,514	0,686	1,039	10,2	0,0765	0,1523	0,1151	35,6852
Fev	475,86	0,219	0,520	0,544	238,827	0,060	14,330	281,05	7,979	10,638	8,791	128,782	156,556	0,543	0,724	1,097	10,4	0,0978	0,2653	0,1854	57,4863
Mar	638,89	0,219	0,520	0,595	337,436	0,060	20,246	283,45	9,381	12,507	9,908	132,959	244,318	0,627	0,835	1,266	10,6	0,1396	0,4141	0,2929	90,8080
Abr	812,93	0,219	0,520	0,610	435,766	0,060	26,146	285,55	10,781	14,373	11,131	129,597	331,831	0,708	0,944	1,431	10,5	0,1729	0,5624	0,4022	124,6743
Mai	883,03	0,219	0,520	0,687	508,743	0,060	30,525	287,75	12,442	16,587	12,399	134,944	396,781	0,804	1,071	1,623	9,7	0,2105	0,6725	0,4964	153,8738
Jun	985	0,219	0,520	0,784	617,211	0,060	37,033	291,75	16,045	21,392	14,763	129,765	483,318	1,005	1,340	2,030	9,4	0,3255	0,8361	0,6676	206,9541
Jul	958,99	0,219	0,520	0,801	609,532	0,060	36,572	294,25	18,737	24,980	15,218	115,373	486,484	1,151	1,535	2,326	9,5	0,4630	0,8245	0,7219	223,7785
Ago	864,95	0,219	0,520	0,814	555,419	0,060	33,325	294,35	18,852	25,134	14,839	116,223	438,323	1,158	1,543	2,338	9,4	0,5054	0,7429	0,6718	208,2536
Set	727,88	0,219	0,520	0,799	461,711	0,060	27,703	292,15	16,452	21,934	14,220	129,389	354,923	1,027	1,369	2,075	9,2	0,3728	0,6016	0,5272	163,4232
Out	537,88	0,219	0,520	0,690	310,613	0,060	18,637	287,95	12,603	16,803	12,960	134,534	220,445	0,813	1,084	1,642	9,8	0,1946	0,3736	0,3059	94,8141
Nov	370,76	0,219	0,520	0,610	198,743	0,060	11,925	283,35	9,318	12,423	10,352	136,084	120,882	0,623	0,830	1,258	10,2	0,1080	0,2049	0,1620	50,2195
Dez	309,85	0,219	0,520	0,610	166,093	0,060	9,966	280,45	7,659	10,211	8,725	142,967	91,823	0,524	0,698	1,058	10,5	0,0793	0,1556	0,1185	36,7457

ANEXO C: RESULTADOS DO ESCOAMENTO AFLUENTE MENSAL CALCULADO ATRAVÉS DA RELAÇÃO PRECIPITAÇÃO-ESCOAMENTO PARA OS DESCRITORES P25, P50 E P75

Tabela 38 - Volume de escoamento afluente à albufeira de Pretarouca nos principais anos de seca e volumes afluentes estimados pelos descritores P25, P50 e P75

Meses	1964/65	1975/76	1980/81	1988/89 (Mais seco)	1991/92	P25	P50	P75
out	325 267	248 276	334 702	213 803	273 692	865 062	2 167 907	4 395 000
nov	960 881	733 439	988 752	631 601	808 522	1 104 316	3 264 186	5 528 335
dez	2 486 951	1 898 286	2 559 086	1 634 708	2 092 615	722 008	2 882 707	6 831 466
jan	3 187 618	2 433 104	3 280 077	2 095 266	2 682 183	1 467 065	4 110 150	6 511 950
fev	4 585 969	3 500 463	4 718 987	3 014 422	3 858 808	966 312	3 308 915	8 005 372
mar	1 964 733	1 499 678	2 021 721	1 291 447	1 653 201	458 645	1 694 162	4 439 646
abr	1 661 548	1 268 257	1 709 742	1 092 159	1 398 090	650 712	1 861 355	3 867 667
mai	1 369 703	1 045 492	1 409 432	900 325	1 152 520	614 775	2 173 520	3 820 731
jun	594 433	453 730	611 675	390 729	500 179	240 021	735 849	1 524 364
jul	191 579	146 232	197 136	125 928	161 202	21 704	182 151	547 752
ago	108 025	82 455	111 158	71 006	90 896	36 904	242 567	682 576
set	81 168	61 955	83 522	53 353	68 297	252 105	957 110	2 636 676
Total	17 517 875	13 371 367	18 025 990	11 514 747	14 740 205	7 399 630	23 580 579	48 791 535

ANEXO D: BALANÇOS HÍDRICOS

Legenda:

NMAi – Nível da água na albufeira inicial;
AI (m³) – Área inundada;
VAI (m³) – Volume armazenado inicial;
Afl.16/17 (m³) – Volume afluente do ano hidrológico 2016/17;
VC (m³) – Volume captado para abastecimento urbano;
DCE(m³) – Volume que descarrega pela Descarga Caudal Ecológico;
SBP (m³) - Volume que passa pelo Sistema “By-Pass”;
DF (m³) – Volume que descarrega pela Descarga de Fundo;
VI (m³) – Volume infiltrado;
VE (m³) – Volume evaporado;
VAF (m³) – Volume armazenado final;
DC (m³) – Volume que descarrega pelo Descarregador de Cheias;
NMAf – Nível da água na albufeira final.

Tabela 39 - Balanço Hídrico para um evento de 2 anos consecutivos com volumes de escoamento afluentes de 2016/17, para o abastecimento de 70%

Meses	NMAi	AI (m³)	VAI (m³)	Afl.16/17 (m³)	VC (m³)	DCE (m³)	SBP (m³)	DF (m³)	VI (m³)	VE (m³)	VAF (m³)	DC (m³)	NMAf
Out	919,5	436 155,50	3 219 041,00	57 592,07	233 764,00	151 780,00	0,00	0,00	589,03	41 353,68	2 850 324,42	0,00	918,62
Nov	918,62	401 674,76	2 850 324,42	1 286 038,19	184 461,00	50 004,54	235 115,46	0,00	589,03	20 171,91	3 647 198,74	428 157,74	919,50
Dez	919,50	436 155,50	3 219 034,00	2 087 131,76	170 718,00	28,57	414 231,43	0,00	589,03	16 026,82	4 705 749,98	1 486 708,98	919,50
Jan	919,50	436 155,50	3 219 041,00	1 086 304,79	174 645,00	61 601,82	434 798,18	0,00	589,03	15 564,30	3 619 325,53	400 284,53	919,50
Fev	919,50	436 155,50	3 219 034,00	5 713 937,77	152 832,00	8 165,03	328 914,97	590 000,00	589,03	25 072,96	7 828 575,84	4 609 534,84	919,50
Mar	919,50	436 155,50	3 219 041,00	978 934,58	172 206,00	44,52	333 865,48	0,00	589,03	39 606,39	3 652 842,23	433 801,23	919,50
Abr	919,50	436 155,50	3 219 041,00	545 611,01	189 869,00	41,32	298 898,68	0,00	589,03	54 377,36	3 222 054,69	3 013,69	919,50
Mai	919,50	436 155,50	3 219 034,00	790 206,66	204 731,00	36,40	282 083,60	0,00	589,03	67 112,92	3 455 865,78	236 824,78	919,50
Jun	919,50	436 155,50	3 219 041,00	236 687,80	251 232,00	48,59	169 291,41	0,00	589,03	90 264,19	2 945 481,64	0,00	918,86
Jul	918,86	410 620,45	2 945 481,64	100 491,71	266 789,00	174 990,00	0,00	0,00	589,03	91 888,02	2 512 895,36	0,00	917,75
Ago	917,75	370 439,20	2 512 895,36	0,00	306 482,00	126 780,00	0,00	0,00	589,03	77 145,32	2 003 077,08	0,00	916,27
Set	916,27	319 247,10	2 003 077,08	0,00	269 905,00	95 040,00	0,00	0,00	589,03	52 172,39	1 586 548,73	0,00	914,88
Out	914,88	278 866,15	1 586 548,73	57 592,07	233 764,00	151 780,00	0,00	0,00	589,03	26 440,44	1 232 745,39	0,00	913,50
Nov	913,50	237 205,95	1 232 745,39	1 286 038,19	184 461,00	50 004,54	235 115,46	0,00	589,03	11 912,37	2 037 879,26	0,00	916,42
Dez	916,42	320 160,06	2 037 879,26	2 087 131,76	170 718,00	28,57	414 231,43	0,00	589,03	11 764,49	3 528 857,56	309 816,56	919,50
Jan	919,50	436 155,50	3 219 041,00	1 086 304,79	174 645,00	61 601,82	434 798,18	0,00	589,03	15 564,30	3 619 325,53	400 284,53	919,50
Fev	919,50	436 155,50	3 219 034,00	5 713 937,77	152 832,00	8 165,03	328 914,97	590 000,00	589,03	25 072,96	7 828 575,84	4 609 534,84	919,50
Mar	919,50	436 155,50	3 219 041,00	978 934,58	172 206,00	44,52	333 865,48	0,00	589,03	39 606,39	3 652 842,23	433 801,23	919,50
Abr	919,50	436 155,50	3 219 041,00	545 611,01	189 869,00	41,32	298 898,68	0,00	589,03	54 377,36	3 222 054,69	3 013,69	919,50
Mai	919,50	436 155,50	3 219 034,00	790 206,66	204 731,00	36,40	282 083,60	0,00	589,03	67 112,92	3 455 865,78	236 824,78	919,50
Jun	919,50	436 155,50	3 219 041,00	236 687,80	251 232,00	48,59	169 291,41	0,00	589,03	90 264,19	2 945 481,64	0,00	918,86
Jul	918,86	410 620,45	2 945 481,64	100 491,71	266 789,00	174 990,00	0,00	0,00	589,03	91 888,02	2 512 895,36	0,00	917,75
Ago	917,75	370 439,20	2 512 895,36	0,00	306 482,00	126 780,00	0,00	0,00	589,03	77 145,32	2 003 077,08	0,00	916,27
Set	916,27	319 247,10	2 003 077,08	0,00	269 905,00	95 040,00	0,00	0,00	589,03	52 172,39	1 586 548,73	0,00	914,88

Tabela 40 - Balanço Hídrico para um evento de 2 anos consecutivos com volumes de escoamento afluentes de 2016/17, para o abastecimento de 100%

Meses	NMAi	AI (m³)	VAI (m³)	Afl.16/17 (m³)	VC (m³)	DCE (m³)	SBP (m³)	DF (m³)	VI (m³)	VE (m³)	VAF (m³)	DC (m³)	NMAf
Out	919,5	436 155,50	3 219 041,00	57 592,07	336 352,31	151 780,00	0,00	0,00	589,03	41 353,68	2 747 736,11	0,00	918,36
Nov	918,36	392 030,48	2 747 736,11	1 038 866,19	265 412,48	50 004,54	235 115,46	0,00	589,03	19 687,58	3 216 971,28	0,00	919,50
Dez	919,50	435 963,30	3 216 971,28	2 087 131,76	245 638,31	28,57	414 231,43	0,00	589,03	16 019,76	4 628 774,01	1 409 733,01	919,50
Jan	919,50	436 155,50	3 219 041,00	654 461,36	251 288,69	61 601,82	434 798,18	0,00	589,03	15 564,30	3 110 838,41	0,00	919,25
Fev	919,25	426 074,16	3 110 838,41	3 900 360,85	219 902,96	8 165,03	328 914,97	590 000,00	589,03	24 493,42	5 840 311,90	2 621 270,90	919,50
Mar	919,50	436 155,50	3 219 041,00	1 059 286,58	247 779,33	44,52	333 865,48	0,00	589,03	39 606,39	3 657 620,90	438 579,90	919,50
Abr	919,50	436 155,50	3 219 041,00	545 611,01	273 193,81	41,32	298 898,68	0,00	589,03	54 377,36	3 138 729,88	0,00	919,32
Mai	919,32	428 673,00	3 138 729,88	830 382,66	294 578,06	36,40	282 083,60	0,00	589,03	65 961,56	3 327 041,96	108 000,96	919,50
Jun	919,50	436 155,50	3 219 041,00	236 687,80	361 486,22	48,59	169 291,41	0,00	589,03	90 264,19	2 835 227,43	0,00	918,58
Jul	918,58	400 255,50	2 835 227,43	100 491,71	383 870,47	174 990,00	0,00	0,00	589,03	89 568,57	2 287 879,13	0,00	917,13
Ago	917,13	350 485,86	2 287 879,13	0,00	440 982,91	126 780,00	0,00	0,00	589,03	72 989,96	1 647 715,29	0,00	915,10
Set	915,10	285 377,00	1 647 715,29	0,00	388 353,94	95 040,00	0,00	0,00	589,03	46 637,23	1 118 273,16	0,00	913,01
Out	913,01	224 801,62	1 118 273,16	57 592,07	336 352,31	151 780,00	0,00	0,00	589,03	21 314,36	667 007,59	0,00	910,67
Nov	910,67	162 589,55	667 007,59	1 038 866,19	265 412,48	50 004,54	235 115,46	0,00	589,03	8 165,17	1 147 765,17	0,00	913,14
Dez	913,14	227 997,40	1 147 765,17	2 087 131,76	245 638,31	28,57	414 231,43	0,00	589,03	8 377,91	2 567 209,74	0,00	917,91
Jan	917,91	375 059,27	2 567 209,74	654 461,36	251 288,69	61 601,82	434 798,18	0,00	589,03	13 384,07	2 461 187,38	0,00	917,61
Fev	917,61	365 853,99	2 461 187,38	3 900 360,85	219 902,96	8 165,03	328 914,97	590 000,00	589,03	21 031,59	5 194 122,70	1 975 081,70	919,50
Mar	919,50	436 155,50	3 219 041,00	1 059 286,58	247 779,33	44,52	333 865,48	0,00	589,03	39 606,39	3 657 620,90	438 579,90	919,50
Abr	919,50	436 155,50	3 219 041,00	545 611,01	273 193,81	41,32	298 898,68	0,00	589,03	54 377,36	3 138 729,88	0,00	919,32
Mai	919,32	428 673,00	3 138 729,88	830 382,66	294 578,06	36,40	282 083,60	0,00	589,03	65 961,56	3 327 041,96	108 000,96	919,50
Jun	919,50	436 155,50	3 219 041,00	236 687,80	361 486,22	48,59	169 291,41	0,00	589,03	90 264,19	2 835 227,43	0,00	918,58
Jul	918,58	400 255,50	2 835 227,43	100 491,71	383 870,47	174 990,00	0,00	0,00	589,03	89 568,57	2 287 879,13	0,00	917,13
Ago	917,13	350 485,86	2 287 879,13	0,00	440 982,91	126 780,00	0,00	0,00	589,03	72 989,96	1 647 715,29	0,00	915,10
Set	915,10	285 377,00	1 647 715,29	0,00	388 353,94	95 040,00	0,00	0,00	589,03	46 637,23	1 118 273,16	0,00	913,01

Tabela 41 - Balanço Hídrico para um evento de 2 anos consecutivos com volumes de escoamento afluentes de 2016/17, para o abastecimento de 100%, com o acréscimo da subida do coroamento do descarregador de cheias à cota 920,0

Meses	NMAi	AI (m³)	VAI (m³)	Afl.16/17 (m³)	VC (m³)	DCE (m³)	SBP (m³)	DF (m³)	VI (m³)	VE (m³)	VAF (m³)	DC (m³)	NMAf
out	920,00	456 468,00	3 437 033,00	57 592,07	336 352,31	151 780,00	0,00	0,00	589,03	43 279,59	2 963 802,20	0,00	918,91
nov	918,91	412 342,76	2 963 802,20	1 286 038,19	265 412,48	50 004,54	235 115,46	0,00	589,03	20 707,65	3 679 189,29	242 156,29	920,00
dez	920,00	456 468,00	3 437 033,00	2 087 131,76	245 638,31	28,57	414 231,43	0,00	589,03	16 773,22	4 848 082,27	1 411 049,27	920,00
jan	920,00	456 468,00	3 437 033,00	1 086 304,79	251 288,69	61 601,82	434 798,18	0,00	589,03	16 289,15	3 759 948,98	322 915,98	920,00
fev	920,00	456 468,00	3 437 033,00	5 713 937,77	219 902,96	8 165,03	328 914,97	590 000,00	589,03	26 240,65	7 978 336,19	4 541 303,19	920,00
mar	920,00	456 468,00	3 437 033,00	978 934,58	247 779,33	44,52	333 865,48	0,00	589,03	41 450,92	3 793 416,37	356 383,37	920,00
abr	920,00	456 468,00	3 437 033,00	545 611,01	273 193,81	41,32	298 898,68	0,00	589,03	56 909,81	3 354 189,43	0,00	919,81
mai	919,81	448 748,88	3 354 189,43	790 206,66	294 578,06	36,40	282 083,60	0,00	589,03	69 050,71	3 499 236,36	62 203,36	920,00
jun	920,00	456 468,00	3 437 033,00	236 687,80	361 486,22	48,59	169 291,41	0,00	589,03	94 467,94	3 049 015,67	0,00	919,11
jul	919,11	420 313,70	3 049 015,67	100 491,71	383 870,47	174 990,00	0,00	0,00	589,03	94 057,16	2 497 178,78	0,00	917,71
ago	917,71	369 045,53	2 497 178,78	0,00	440 982,91	126 780,00	0,00	0,00	589,03	76 855,08	1 853 149,82	0,00	915,79
set	915,79	303 691,46	1 853 149,82	0,00	388 353,94	95 040,00	0,00	0,00	589,03	49 630,23	1 320 714,68	0,00	913,87
out	913,87	246 738,38	1 320 714,68	57 592,07	336 352,31	151 780,00	0,00	0,00	589,03	23 394,27	867 369,20	0,00	911,80
nov	911,80	192 523,48	867 369,20	1 286 038,19	265 412,48	50 004,54	235 115,46	0,00	589,03	9 668,43	1 593 795,51	0,00	914,91
dez	914,91	279 754,04	1 593 795,51	2 087 131,76	245 638,31	28,57	414 231,43	0,00	589,03	10 279,75	3 011 338,25	0,00	919,02
jan	919,02	416 803,03	3 011 338,25	1 086 304,79	251 288,69	61 601,82	434 798,18	0,00	589,03	14 873,70	3 335 669,69	0,00	919,77
fev	919,77	447 023,27	3 335 669,69	5 713 937,77	219 902,96	8 165,03	328 914,97	590 000,00	589,03	25 697,71	7 877 515,82	4 440 482,82	920,00
mar	920,00	456 468,00	3 437 033,00	978 934,58	247 779,33	44,52	333 865,48	0,00	589,03	41 450,92	3 793 416,37	356 383,37	920,00
abr	920,00	456 468,00	3 437 033,00	545 611,01	273 193,81	41,32	298 898,68	0,00	589,03	56 909,81	3 354 189,43	0,00	919,81
mai	919,81	448 748,88	3 354 189,43	790 206,66	294 578,06	36,40	282 083,60	0,00	589,03	69 050,71	3 499 236,36	62 203,36	920,00
jun	920,00	456 468,00	3 437 033,00	236 687,80	361 486,22	48,59	169 291,41	0,00	589,03	94 467,94	3 049 015,67	0,00	919,11
jul	919,11	420 313,70	3 049 015,67	100 491,71	383 870,47	174 990,00	0,00	0,00	589,03	94 057,16	2 497 178,78	0,00	917,71
ago	917,71	369 045,53	2 497 178,78	0,00	440 982,91	126 780,00	0,00	0,00	589,03	76 855,08	1 853 149,82	0,00	915,79
set	915,79	303 691,46	1 853 149,82	0,00	388 353,94	95 040,00	0,00	0,00	589,03	49 630,23	1 320 714,68	0,00	913,87

Tabela 42 - Balanço Hídrico para um evento de 2 anos consecutivos com volumes de escoamento afluentes baseados nos valores de precipitação definidos pelo descritor estatístico P25, para um abastecimento de 100%

Meses	NMAi	AI (m³)	VAI (m³)	Afl.16/17 (m³)	VC (m³)	DCE (m³)	SBP (m³)	DF (m³)	VI (m³)	VE (m³)	VAF (m³)	DC (m³)	NMAf
Out	919,5	436 155,50	3 219 041,00	865 062,39	336 352,31	151 780,00	0,00	0,00	589,03	41 353,68	3 555 206,43	336 165,43	919,50
Nov	919,50	436 155,50	3 219 041,00	1 104 316,36	265 412,48	50 004,54	235 115,46	0,00	589,03	21 903,51	3 751 510,40	532 469,40	919,50
Dez	919,50	436 155,50	3 219 041,00	722 008,49	245 638,31	28,57	414 231,43	0,00	589,03	16 026,82	3 265 713,39	46 672,39	919,50
Jan	919,61	440 504,95	3 219 041,00	1 467 064,90	251 288,69	61 601,82	434 798,18	0,00	589,03	15 719,51	3 923 286,74	704 245,74	919,50
Fev	919,50	436 155,50	3 219 041,00	966 311,88	219 902,96	8 165,03	328 914,97	590 000,00	589,03	25 072,96	3 013 885,99	0,00	919,03
Mar	919,03	417 040,42	3 013 885,99	458 644,90	247 779,33	44,52	333 865,48	0,00	589,03	37 870,59	2 853 560,01	0,00	918,63
Abr	918,63	401 978,94	2 853 560,01	650 711,68	273 193,81	41,32	298 898,68	0,00	589,03	50 116,43	2 882 610,49	0,00	918,70
Mai	918,70	404 709,96	2 882 610,49	614 775,39	294 578,06	36,40	282 083,60	0,00	589,03	62 274,27	2 859 002,58	0,00	918,64
Jun	918,64	402 490,59	2 859 002,58	240 020,76	361 486,22	48,59	169 291,41	0,00	589,03	83 297,10	2 485 489,07	0,00	917,67
Jul	917,67	366 309,77	2 485 489,07	21 703,80	383 870,47	174 990,00	0,00	0,00	589,03	81 972,24	1 866 949,19	0,00	915,84
Ago	915,84	304 921,67	1 866 949,19	36 903,87	440 982,91	126 780,00	0,00	0,00	589,03	63 501,05	1 273 178,13	0,00	913,67
Set	913,67	241 587,28	1 273 178,13	252 105,25	388 353,94	95 040,00	0,00	0,00	589,03	39 480,97	1 002 997,50	0,00	912,47
Out	912,47	210 295,18	1 002 997,50	865 062,39	336 352,31	151 780,00	0,00	0,00	589,03	19 938,94	1 360 577,67	0,00	914,03
Nov	914,03	251 179,77	1 360 577,67	1 104 316,36	265 412,48	50 004,54	235 115,46	0,00	589,03	12 614,12	1 902 336,46	0,00	915,96
Dez	915,96	308 076,44	1 902 336,46	722 008,49	245 638,31	28,57	414 231,43	0,00	589,03	11 320,47	1 953 715,20	0,00	916,13
Jan	916,13	312 656,85	1 953 715,20	1 467 064,90	251 288,69	61 601,82	434 798,18	0,00	589,03	11 157,22	2 662 523,22	0,00	918,16
Fev	918,16	383 707,46	2 662 523,22	966 311,88	219 902,96	8 165,03	328 914,97	590 000,00	589,03	22 057,92	2 460 383,25	0,00	917,60
Mar	917,60	365 782,68	2 460 383,25	458 644,90	247 779,33	44,52	333 865,48	0,00	589,03	33 215,98	2 304 711,89	0,00	917,17
Abr	917,17	352 871,81	2 304 711,89	650 711,68	273 193,81	41,32	298 898,68	0,00	589,03	43 994,03	2 339 884,76	0,00	917,30
Mai	917,30	357 560,80	2 339 884,76	614 775,39	294 578,06	36,40	282 083,60	0,00	589,03	55 019,25	2 323 531,88	0,00	917,25
Jun	917,25	355 700,57	2 323 531,88	240 020,76	361 486,22	48,59	169 291,41	0,00	589,03	73 613,71	1 959 701,75	0,00	916,15
Jul	916,15	313 190,55	1 959 701,75	21 703,80	383 870,47	174 990,00	0,00	0,00	589,03	70 085,30	1 353 048,81	0,00	914,00
Ago	914,00	250 242,14	1 353 048,81	36 903,87	440 982,91	126 780,00	0,00	0,00	589,03	52 113,84	770 664,96	0,00	911,32
Set	911,32	178 413,82	770 664,96	252 105,25	388 353,94	95 040,00	0,00	0,00	589,03	29 156,96	510 808,34	0,00	909,64